



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Análisis morfológico de alta resolución en una cuenca torrencial. Aplicación de dron y fotogrametría digital en el barranco el Rebaixader (Pirineo Central).

Trabajo realizado por:

María Martín Serna

Dirigido por:

Marcel Hürlimann Ziegler

Roger Ruiz Carulla

Màster en:

Ingeniería del terreno

Barcelona, 11 de junio de 2019

Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica.

TRABAJO FINAL DE MÀSTER

Resumen

Actualmente, en nuestro país, los movimientos de masa son procesos muy frecuentes tanto en el espacio como en el tiempo. Particularmente, en el pirineo central, se encuentra una de las laderas inestables más activas, el barranco de Rebaixader. Se trata de un flujo de derrubios (Debris Flow) combinado con desprendimientos de rocas (Rockfall), el cual es objeto de estudio de este trabajo de fin de máster.

Este barranco, se encuentra situado cerca de la población de Senet de Barrabés (comarca de la alta Ribagorza, provincia de Lérida), y geológicamente se ubica sobre una antigua morrena lateral. La erosión producida por este material ha sido la causante de la formación de este movimiento de masa.

Durante los últimos años, esta zona ha experimentado un crecimiento urbanístico importante debido al ocio y al turismo, por ello se hace importante estudiar la zona morfológicamente para evitar daños de infraestructuras y como consecuencia daños humanos.

Este trabajo, se centra en estudiar el barranco morfológicamente mediante técnicas geomáticas avanzadas, un dron. El uso del dron, proporciona ortofotos con una resolución muy alta, incluso de hasta diez veces mejor que la realizada con las fotografías aéreas, no tiene la necesidad de ser pilotado, es fácil de utilizar, transportable, y económico. Además, permite trabajar en 3D sin la necesidad de correr el peligro de acceder in situ al lugar, y estar expuesto a vulnerabilidad.

A partir de la adquisición de ortofotos obtenidas con el dron, se lleva a cabo el estudio del barranco a partir de los softwares Qgis y CloudCompare, que serán los programas por excelencia para su posterior análisis.

En los análisis, se pretende hacer una fotointerpretación general del barranco a partir de la cartografía en detalle de la zona, el recorrido del flujo preferente en cada año, la trayectoria de algunos de los bloques, y el recuento final de bloques, a partir del cual, se va a hacer una estimación del volumen de material movilizado, y la determinación de los factores causantes, estableciendo con ello una relación entre los mismos. Además, se va a llevar a cabo la ejecución de mapas de diferencias para determinar la erosión y depósito generada en el transcurso de tiempo de 2016 a 2018.

Con todo ello, finalmente se han obtenidos valores reales del barranco, en los que se confirma que con el transcurso de los años el barranco ha sufrido cambios significativos.

Abstract

Currently, in our country, mass movements are very frequent processes both in space and time. Particularly, in the central Pyrenees, one of the most active natural slopes of our country, specifically the Rebaixader catchment. It is a debris Flow combined with rockfalls, which is the subject of study of this end of master's work.

This catchment, is located near the town of Senet de Barrabés (region of the upper Ribagorza, province of Lleida), and geologically is located on an old side moraine. The erosion produced by this material has been the cause of the formation of this mass movement.

In recent years, this area has experienced significant urban growth due to leisure and tourism, so it is important to study the area morphologically to avoid infrastructure damage and consequently human damage.

This work focuses on studying the gorge morphologically using advanced geomatics techniques, a drone. The use of the drone, provides orthophotos with a very high resolution, even up to ten times better than that made with aerial photographs, has no need to be piloted, is easy to use, transportable, and economical. In addition, it allows to work in 3D without the need to run the risk of accessing the site in situ, and be exposed to vulnerability.

From the acquisition of orthophotos obtained with the drone, the study of the catchment is realized from the Qgis and CloudCompare softwares, which will be the programs for their subsequent analysis.

In the analyzes, it is intended to make a general photointerpretation of the catchment from the detailed cartography of the area, the route of the preferred flow in each year, the trajectory of some of the blocks, and the final count of blocks, starting from which is going to make an estimate of the volume of material mobilized, and the determination of the causative factors, in this way establishing a relationship between them. In addition, the execution of difference maps will be realized to determine the erosion and deposit generated in the course of time from 2016 to 2018.

With all this, finally real values of the catchment have been obtained, in which it is confirmed that over the years the catchment has undergone significant changes.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Motivación	9
1.2. Objetivos	10
1.3. Estructura del trabajo.....	10
2. CONCEPTOS BÁSICOS	12
2.1. Movimientos de masa.....	12
2.2. Corrientes de derrubios (<i>Debris flows</i>) y sus características	16
2.2.1. Factores causantes de los <i>Debris Flows</i>	18
2.3. Desprendimientos o caída de bloques (rockfall) y sus características.....	19
3. ZONA DE ESTUDIO	20
3.1. Localización geográfica	20
3.1.1. Geología de la zona	21
3.1.2. Trabajos previos	23
3.2. Instrumentación del barranco.....	28
4. METODOLOGÍA.....	30
4.1. Fase 1: Fase de estudio	30
4.2. Fase 2: Fase de campo	33
4.3. Fase 3: Fase de gabinete	36
4.4. Fase 4: Fase de Post-procesado (Qgis, CloudCompare).....	38
4.4.1. Ortofotos	40
4.4.2. DEM (modelo digital de elevaciones).....	44
5. RESULTADOS	50
5.1. Foto- Interpretación.....	50
5.2. Nubes de puntos 3D	72
5.3. DEMS	76
5.4. Volumen total.....	90
6. CONCLUSIONES	95
7. BIBLIOGRAFÍA.....	98
Anejos.....	I
Anejo 1. Cartografías de la zona de estudio.....	II
Cartografías individuales	II
Cartografía de la evolución de la línea de escarpe	VI
Recuento de bloques presentes en un año, y no en otro, y viceversa	VII

Conjunto de bloques presentes en cada año.....	X
Red hídrica general.....	XIV
Flujo preferente de cada año	XV
Flujo preferente de los cuatro años	XIX
Anejo 2. Tabla bloques de rocas 2016, 2017,2018jun,2018nov junto con las longitudes de cada bloque.....	XX
Anejo 3. Tabla de bloques clasificados según tamaño, y partes del barranco, e histogramas de cada una de las partes.....	XXXVI
Área fuente.....	XXXVI
Canal.....	XXXVII
Cono de deyección	XXXVII
Anejo 4. Distribuciones fractales.....	XXXVIII
Anejo 5. Tabla volumen de bloques >2 metros desprendidos, e histogramas.	XLI
Anejo 6. Datos pluviométricos año 2016-2017-2018.	XLIV
Anejo7. Tablas de datos de los eventos anuales, y volumen anual desprendido por año. ..	XLV
Anejo 8. Modelos de elevación digital del área fuente, canal, y cono de deyección.	XLVI
Anejo 9. Plantilla mapa de diferencias de erosión- depósito del área fuente, canal, y depósito, y plantillas de mapa de diferencias de los contornos específicos.	XLIX
Anejo 10. Algunas alineaciones realizadas de la zona del área fuente, canal y cono de deyección.	LIV
Anejo 11. Alineaciones automáticas	LVIII
Anejo 12. Plantillas mapas de diferencias CloudCompare.....	LXVIII
Área fuente.....	LXVIII
Canal.....	LXXII
Cono de deyección	LXXIII
Anejo 13. Volumen total acumulado/desprendido entre la ortofoto de 2016 y junio de 2018.	LXXIV

INDICE DE FIGURAS

Figura. 1. Desprendimiento o caídas (Alcántara, 2000).....	14
Figura. 2. Vuelcos o desplomes (Alcántara, 2000).....	14
Figura. 3. Deslizamientos (Alcántara, 2000).....	15
Figura. 4. Flujos (Alcántara, 2000).....	15
Figura. 5. Expansiones laterales (Alcántara, 2000).	16
Figura. 6. Zonas geomorfológicas del barranco Rebaixader. Área fuente en rosa, canal en verde, y el cono de deyección en verde claro con puntos.	17
Figura. 7. Localización de la zona de estudio señalada con una flecha roja, la cual está situada entre los pueblos de Senet de Barrabés y Aneto. (Google Maps, ortofoto de 2011).....	20
Figura. 8. Mapa topográfico de la zona de estudio a una escala de 1: 5.000 (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, ICGC).....	21
Figura. 9. Mapa geológico del IGME general correspondiente a la MAGNA 50- Hoja 180 (BENASQUE, 32-9) mapa editado escaneado, en el que se muestra en detalle el área de estudio. (IGME, 1991).	22
Figura. 10. Leyenda de los materiales presentes en la zona de estudio, perteneciente al mapa geológico del IGME general correspondiente a la MAGNA 50- Hoja 180 (BENASQUE) (IGME, 1991).	23
Figura. 11. A) Mapa con la actividad en el cono de deyección durante año 2011. B) Mapa con la actividad del cono de deyección, año 2013. C) Mapa con la actividad del cono de deyección del año 2016. En general, los puntos que se ven representados muestran bloques de rocas que se han tenido en cuenta durante la realización de la tesis. Los números asociados a estos son el año o los años en los que el bloque se encontraba en esa posición. La capa barrer es una representación de un espacio ocupado por una acumulación de bloques los cuales pueden llegar a obstruir el cono en el que se hallan. El color de los conos de deyección es una referencia respecto la actividad que tienen estos en el momento de estudio. (G. Vallés González, 2017).27	27
Figura. 12. Ortofoto del barranco con la correspondiente ubicación de los aparatos instalados en el barranco que forman la instrumentación del mismo.	29
Figura. 13. Resumen de la metodología que se va a seguir en el correspondiente trabajo de fin de master.	30
Figura. 14. Dron utilizado para crear la última ortofoto de noviembre de 2018.....	32
Figura. 15. Trayectoria de vuelo ejecutada en el área de estudio. (R. Carulla, 2018).	33
Figura. 16. Fotos tomadas en noviembre de 2018, para realizar el último vuelo de dron. La foto superior, se localiza en la zona alta del barranco para ejecutar la fase 3 del vuelo (Figura.17.), y la foto inferior se localiza en la zona baja del barranco para ejecutar la fase 1 y 2 del vuelo (Figura.17.) en la que se puede observar el inicio del vuelo del dron.	34
Figura. 17. Trayectoria de vuelo ejecutada en el área de estudio. (R. Carulla, 2018)	35
Figura. 18. Trayectoria de vuelo general que se ha seguido para obtener una ortofoto (Aerial insights).	35
Figura. 19. Esquema de cómo obtener ortofotos georreferenciadas de alta resolución (James et al. 2017).....	37
Figura. 20. Representación gráfica de cómo calcular la distancia entre dos nubes de puntos. (Girardeau-Montaut, D., 2017).	40

Figura. 21. Aumento de una zona específica del canal en la que, debido al vuelo realizado con el dron, se observan con precisión los bloques presentes en el mismo. Ortofoto correspondiente a 2017 en la que se puede observar la buena resolución obtenida.	41
Figura. 22. Ejemplo de cómo se van a presentar las cartografías en detalle de las 4 ortofotos disponibles. Cartografía correspondiente a la ortofoto de 2017.....	42
Figura. 23. Mapas de precisión y de errores verticales para levantamientos UAV simulados ya georreferenciados. Los cuatro escenarios que se presentan en este caso, se caracterizan por presentar una georreferenciación fuerte (a, b), o débil (c, d). Los valores insertados en la parte superior derecha de cada gráfico de precisión, proporcionan la precisión en el punto medio (en mm) dentro de la región abarcada por la línea discontinua en a) (James et al., 2017).....	45
Figura. 24. Ejemplo de uno de los DEMs obtenidos del escarpe pertenecientes al año 2017 con su correspondiente leyenda y escala.	46
Figura. 25. Ejemplo de unos de los DEMs del canal pertenecientes al año 2017.	46
Figura. 26. Ejemplo de uno de los DEMs del cono de deyección pertenecientes al año 2017 con su correspondiente leyenda y escala.	47
Figura. 27. Red Hídrica del área de estudio obtenida con el programa SAGA GIS.	48
Figura. 28. Cartografía en detalle del barranco Rebaixader perteneciente al año 2016 (zona superior izquierda), 2017 (zona superior derecha), 2018JUN (zona inferior izquierda), y 2018NOV (zona inferior derecha) donde quedan representadas las distintas partes del barranco: área fuente, canal, cono de deyección, y línea de escarpe.....	51
Figura. 29. Ortofoto de la zona de estudio en la que se presentan las líneas de escarpe de 2016 (rosa), 2017 (azul), 2018JUN (amarillo), y 2018NOV (verde) con la que se hace una comparativa de las mismas para observar la existencia de erosión en el límite del escarpe con el transcurso del tiempo.	52
Figura. 30. Líneas de flujo preferente de los años 2016 y 2017.	53
Figura. 31. Líneas de flujo preferente de los años 2018JUN, y 2018NOV.....	54
Figura. 32. Líneas de flujo preferente obtenidas de las 4 ortofotos, representadas en la ortofoto del año 2018.....	55
Figura. 33. Cartografía de los bloques presentes en los años 2016, 2017, 2018JUN, y 2018NOV.	56
Figura. 34. Mapa final de comparativa de bloques de los años, 2016-2017, y 2017-2018JUN, donde se representan los bloques presentes en un año y no en otro y viceversa. Además, se ha ampliado una zona concreta para la visualización de algunos de los bloques marcados, donde en la imagen A, se presentan los bloques presentes en 2016 y no en 2017, y en la imagen B, se presentan los bloques presentes en 2017 y no en 2018JUN.	58
Figura. 35. Mapa final de comparativa de bloques de los años 2018JUN-2018NOV, donde se representan los bloques presentes en un año y no en otro y viceversa. Además, se ha ampliado una zona concreta para la visualización de algunos de los bloques marcados, donde en la imagen C, se presentan los bloques presentes en 2018JUN y no en 2017, y en la imagen D, se presentan los bloques presentes en 2018NOV y no en 2018JUN.	59
Figura. 36. Imagen perteneciente a la ortofoto del 2017, donde se representa una de las trayectorias seguidas de las rocas con el transcurso del tiempo, y la distancia que ha recorrido aproximadamente.....	60

Figura. 37. Imagen perteneciente a la ortofoto de junio de 2018, donde se representa una de las trayectorias seguidas de las rocas con el transcurso del tiempo, y la distancia que ha recorrido aproximadamente.	61
Figura. 38. Imagen perteneciente a la ortofoto de junio de 2018, donde se representa una de las trayectorias seguidas de las rocas con el transcurso del tiempo, y la distancia que ha recorrido aproximadamente.	62
Figura. 39. Histogramas del número total de rocas en la zona del área fuente del barranco Rebaixader. Se puede observar que la barra de cada color representa diferente tamaño de bloques, siendo: Bloques grandes ≥ 2 metros de color azul, Bloques medianos, > 1 metro y < 2 metros de color rojo, y bloques pequeños ≤ 1 metro de color verde.	63
Figura. 40. Histogramas del número total de rocas en la zona del canal del barranco Rebaixader. Se puede observar que la barra de cada color representa diferente tamaño de bloques, siendo: Bloques grandes ≥ 2 metros de color azul, Bloques medianos, > 1 metro y < 2 metros de color rojo, y bloques pequeños ≤ 1 metro de color verde.	64
Figura. 41. Histogramas del número total de rocas en la zona del cono de deyección del barranco Rebaixader. Se puede observar que la barra de cada color representa diferente tamaño de bloques, siendo: Bloques grandes ≥ 2 metros de color azul, Bloques medianos, > 1 metro y < 2 metros de color rojo, y bloques pequeños ≤ 1 metro de color verde.	65
Figura. 42. Gráficos de dispersión de los años 2016 (azul), 2017 (rojo), 2018Jun (verde), y 2018NOV (morado con su correspondiente línea de tendencia.	66
Figura. 43. Gráficas de dispersión general de los cuatro casos; ortofoto 2016, 2017, 2018JUN, y 2018NOV, en la que su función es de curva granulométrica indicando si el tamaño de bloques desprendidos es mayor o menor.	67
Figura. 44. Gráfica de dispersión general de los 4 casos; ortofoto 2016, 2017, 2018JUN, y 2018nov, donde se puede observar la línea de tendencia que sigue cada curva con su correspondiente pendiente.	68
Figura. 45. Precipitación total registrada entre ortofotos.	69
Figura. 46. Histograma en el que se presenta el volumen de los bloques desprendidos mayores a dos metros de los años 2016, 2017, 2018JUN y 2018NOV.	70
Figura. 47. Gráfica granulométrica de los bloques medidos en cada ortofoto junto con los datos pluviométricos (Pp).	71
Figura. 48. Gráfica general en la que se relaciona el volumen anual de bloques desprendidos en cada año, los eventos de precipitaciones más grandes registradas, y los datos pluviométricos.	72
Figura. 49. Imagen en la que se muestra un ejemplo de la alineación realizada en el programa CloudCompare con los valores de RMS, en este caso la del escarpe de 2018NOV.	73
Figura. 50. Ejemplo de alineación automática realizada para el canal de 2018NOV.	73
Figura. 51. DEMs del escarpe obtenidos en CloudCompare.	74
Figura. 52. DEMs del canal obtenidos en CloudCompare.	75
Figura. 53. DEMs del depósito obtenidos en CloudCompare.	76
Figura. 54. Mapa de diferencias del área fuente donde se presentan los diferentes saltos de tiempo, y en los que se observan las zonas de erosión y depósito.	78
Figura. 55. Contorno específico de una zona concreta del escarpe en la que se han calculado las diferencias en el transcurso del tiempo.	80

Figura. 56. Mapa de diferencias del canal donde se presentan los diferentes saltos de tiempo, y en los que se observan las zonas de erosión y depósito.....	81
Figura. 57. Plantilla de una zona específica del canal, donde se han aplicado las diferencias con respecto al transcurso del tiempo.	83
Figura. 58. Mapa de diferencias del cono de deyección donde se presentan los diferentes saltos de tiempo, y en los que se observan las zonas de erosión y depósito.	84
Figura. 59. Mapas de diferencias del área fuente obtenidos con el programa CloudCompare, donde se presentan los diferentes saltos de tiempo, y en los que se observan las zonas de erosión y depósito.....	85
Figura. 60. Mapas de diferencias del canal obtenidos con el programa Cloudcompare, donde se presentan los diferentes saltos de tiempo, y en los que se observan las zonas de erosión y depósito.....	87
Figura. 61. Mapas de diferencias del cono de deyección obtenidos con el programa Cloudcompare, donde se presentan los diferentes saltos de tiempo, y en los que se observan las zonas de erosión y depósito.....	89
Figura. 62. Estimación del volumen total del área fuente en el transcurso de tiempo de 2016 a 2018.....	91
Figura. 63. Estimación del volumen total del canal en el transcurso de tiempo de 2016 a 2018.	92
Figura. 64. Estimación del volumen total del cono de deyección en el transcurso de tiempo de 2016 a 2018.....	94

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los procesos de movimiento de masa (Alcántara, 2000), la cual se ha vuelto a hacer por falta de resolución. En un cuadro azul, aparece el movimiento de masa de interés para este estudio.	13
Tabla 2. Número total de bloques de rocas de diferentes tamaños presentes en el barranco.	63

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Los movimientos de masa son fenómenos muy frecuentes en el tiempo y en el espacio en áreas de montaña. La presencia de elevadas precipitaciones (lluvia, nieve), alternancia de pendientes, fracturas o discontinuidades en el sustrato rocoso, acompañado de las zonas tectonizadas o meteorizadas con mayor o menor intensidad, favorecen la formación de este tipo de movimientos. Varios trabajos confirman la presencia de distintos tipos de movimientos en masa en la zona de los pirineos (García- Ruiz, et al., 2004), y concretamente en este trabajo se va a estudiar un flujo de derrubios en Senet de Barrabés. En el caso de este estudio, el factor desencadenante es principalmente el agua, que provoca roturas superficiales transformándose en una corriente de derrubios (*Debris flow*).

El crecimiento urbanístico en este último siglo ha supuesto una exposición mayor, generando una alerta en cuanto a la prevención y mitigación de riesgos tanto materiales como humanos. Para prevenir y mitigar los efectos e impactos de estos movimientos, es muy importante gestionar el territorio y proceder a una planificación, teniendo en cuenta la organización social, económica y territorial que sirva como instrumento de defensa ante estos riesgos naturales (Mampaso torremocha, 2016).

Este trabajo de fin de master, dirigido por la Universidad Politécnica de Cataluña se ha iniciado en 2018, aunque el estudio del mismo comenzó en 2009. La zona de estudio es el barranco de Rebaixader, situado cerca de la población de Senet de Barrabés. Este barranco presenta una de las corrientes de derrubios más grande de nuestro país (Vallés González, 2017) tanto a nivel volumétrico como de actividad, caracterizado por presentar materiales glaciares o till de edad cuaternaria.

La cuenca de Rebaixader, es un lugar perfecto para aplicar y comparar las diferentes técnicas geomáticas para realizar en detalle el análisis de cambios morfológicos. Por lo tanto, debido a la importancia que suponen los daños provocados por estos movimientos, es necesario estudiar sus causas, su localización y sus posibles efectos sobre la población, y comprender mejor la zona estudiada.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo, es analizar la evolución del barranco con respecto a la erosión y depósito producida entre el año 2016 y 2018, observar los cambios geomorfológicos de la zona, y comprobar la utilidad de drones como herramienta para estudiar los procesos geomorfológicos de alta montaña.

Para ello, se pretende conseguir una serie de objetivos específicos:

- Conocer las ventajas que implica la utilización del dron a la hora de obtener datos de campo, sus características principales, y adquirir datos fiables a partir del plan de vuelo.
- Tener un conocimiento base en los programas como Qgis y CloudCompare, programas necesarios para realizar la cartografía en detalle de la zona, las alineaciones de cada una de las zonas del área de estudio para convertirlas en DEM (modelos de elevación digital) y trabajar en Qgis posteriormente, y poder tener una visión 3D a partir de los puntos obtenidos con el dron.
- Estimar un volumen de material movilizado de los años 2016, 2017 y 2018, y un volumen total de estos años.
- Comparar la erosión y depósito generada en el transcurso de los años con la precipitación registrada en el barranco.
- Representar para cada año mediante histogramas, el volumen y área de los bloques más grandes desprendidos, y compararlos.
- Dibujar la trayectoria que han seguido algunos de los bloques desprendidos en los años 2016, 2017, y 2018.
- Observar los cambios en la geomorfología de la zona desde el año 2016 a 2018, es decir, principalmente la erosión y depósito producida.
- Correlacionar los resultados obtenidos de la erosión y depósito con los distintos softwares utilizados.

1.3. Estructura del trabajo

Este trabajo de fin de master se va a dividir principalmente en tres partes. La primera, se centra en introducir los conceptos geomorfológicos como es un movimiento de masa, y en concreto un *debris flow*, y cuáles son los factores causantes del mismo. También, se hace hincapié en el contexto geológico y geográfico de la zona de estudio, y en las características del dron (UAV), con el que se han obtenido las imágenes de la zona desde el año 2016 hasta noviembre de 2018, y a partir del cual se ha podido trabajar con los softwares y llevar a cabo la cartografía en detalle de la zona de estudio. La segunda parte, se centra en estudiar y ejecutar el desarrollo de todo el

trabajo en el que se van a obtener una serie de datos a partir de los distintos softwares y gráficos utilizados. Con ellos, se va a establecer la correlación entre las distintas técnicas utilizadas, hallazgos de las zonas de erosión y depósito en los últimos años, y volúmenes de roca movilizada.

Finalmente, se van a presentar los resultados obtenidos de la segunda parte y la interpretación de los mismos, reflejando unas conclusiones finales. También se incluye la bibliografía y como punto final los anexos, en los que se adjuntan tablas y figuras que aportan mejor visibilidad y entendimiento del trabajo.

2. CONCEPTOS BÁSICOS

A continuación, se procede a definir que es un movimiento de masa y a que es debido. Nos centraremos en este término, y concretamente en que es un flujo de derrubios para entender el concepto y las causas por las que ha sucedido este fenómeno en el área de estudio.

2.1. Movimientos de masa

Los movimientos de masa se definen como desplazamientos del terreno a favor de la pendiente, que se generan por acción de la fuerza de gravedad, bajo la influencia de ciertos factores como son el agua, los eventos sísmicos, la aplicación de carga excesiva, entre otros. Estos movimientos producen cambios visibles en el terreno como agrietamientos, hundimientos e incluso desprendimientos de grandes cantidades de suelo o roca, pudiendo ocasionar daños de infraestructuras y propiciar el represamiento de cauces de ríos o quebradas (Alcaldía de Medellín- Colombia. Movimientos en masa.)

Peck (1894) y Varnes (1958) los definen como: “Un desplazamiento de materiales formadores de laderas, originado bajo la influencia de la gravedad y sin el empleo de transporte alguno” (Castillo,2015).

Por lo tanto, se puede definir un movimiento de ladera como la serie de desplazamientos que sufre el material que forma una ladera, inducida por factores propios de la misma y activada por factores físicos externos, siendo la fuerza motriz predominante del movimiento la gravedad de la tierra (Castillo, 2015).

Existen numerosas definiciones de movimiento de masa, así como clasificaciones de movimiento de masa. De todas las existentes, la considerada más acertada es la de Varnes (1978) y Hutchinson (1988) porque diferencia entre el tipo de movimiento y la influencia de los materiales. De acuerdo con esta clasificación, los movimientos de masa se subdividen de acuerdo a los materiales que presentan y son (Tabla 1):

- Desprendimientos o caídas
- Vuelcos o desplomes
- Deslizamientos
- Flujos
- Expansiones laterales
- Movimientos complejos del terreno

Tabla 1. Clasificación de los procesos de movimiento de masa (Alcántara, 2000), la cual se ha vuelto a hacer por falta de resolución. En un cuadro azul, aparece el movimiento de masa de interés para este estudio.

Mecanismos de movimiento	Tipo de material involucrado		
	Roca (rock)	Derrubios (Debris)	Suelo (soil)
Desprendimientos(<i>fall</i>)	Caída o desprendimientos de rocas (<i>Rockfall</i>)	Caída o desprendimientos de derrubios (<i>debris fall</i>)	Caída o desprendimiento de suelos (<i>soil fall</i>)
Vuelco o desplome (<i>topple</i>)	Vuelco o desplome de rocas (<i>Rock topple</i>)	Vuelco o desplome de derrubios (<i>debris topple</i>)	Vuelco o desplome de suelos (<i>soil topple</i>)
Deslizamiento rotacional simple (<i>rotational slide</i>)	Individual (<i>simple</i>) Múltiple (<i>multiple</i>) Sucesivo (<i>successive</i>)	Individual (<i>simple</i>) Múltiple (<i>multiple</i>) Sucesivo (<i>successive</i>)	Individual (<i>simple</i>) Múltiple (<i>multiple</i>) Sucesivo (<i>successive</i>)
Deslizamiento translacional o de bloques- no rotacional (<i>translational slice, non-rotational</i>)	Deslizamiento de roca en bloque (<i>block slide</i>)	Deslizamiento de derrubios en bloque (<i>block slide</i>)	Deslizamiento translacional de suelos (<i>slab slide</i>)
Deslizamiento planar	Deslizamiento de rocas (<i>rock slide</i>)	Deslizamiento de derrubios (<i>debris slide</i>)	Coladas de barro (<i>mudslide</i>)
Flujos (<i>flow</i>)	Flujo de rocas (<i>rock flow</i>)	Corrientes de derrubios (<i>debris flow</i>)	Flujos de tierra, arena o suelo (<i>soil flow</i>)
Expansión lateral (<i>lateral spreading</i>)	Expansiones laterales en rocas (<i>rock spreading</i>)	Expansiones laterales en derrubios (<i>debris spread</i>)	Expansiones laterales en suelos (<i>soil spreading</i>)
Complejo (<i>complex</i>)	Ejemplo: Alud de rocas (<i>rock avalanche</i>)	Ejemplo: Flujo deslizante (<i>flow slide</i>)	Ejemplo: Rotación con flujo de tierras (<i>slump-earthflow</i>)

A continuación, se explican brevemente los distintos movimientos de masa:

Desprendimientos o caídas (Falls)

Movimientos en caída libre de distintos materiales tales como rocas, detritos o suelos (Figura. 1.). Este tipo de movimiento se origina por el desprendimiento del material de una superficie con fuerte pendiente, el cual puede rebotar, rodar, deslizarse o fluir ladera abajo posteriormente. La velocidad de estos movimientos normalmente es rápida o extremadamente rápida (Alcántara, 2000).

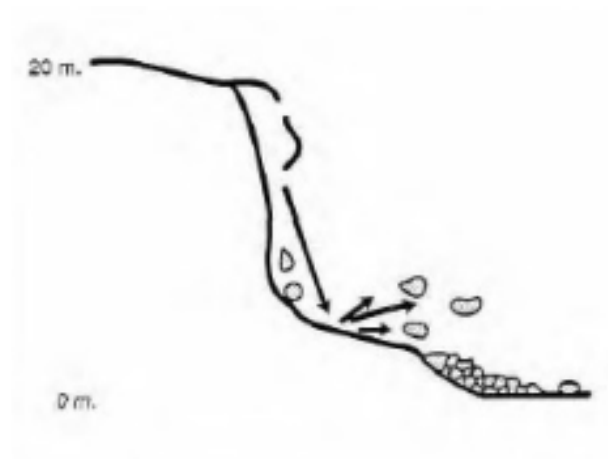


Figura. 1. Desprendimiento o caídas (Alcántara, 2000)

Vuelcos o desplomes (Topple)

Rotación de una masa de suelo, detritos o roca, con un movimiento hacia adelante o hacia la parte externa que involucra inclinación o basculamiento, pero no colapsamiento, en materiales que presentan familias de discontinuidades como son, diaclasas, grietas de tensión o superficies columnares (Figura. 2.).

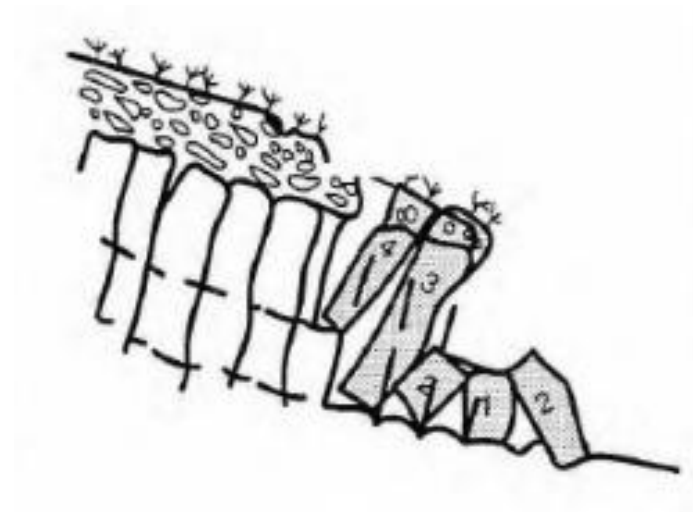


Figura. 2.Vuelcos o desplomes (Alcántara, 2000).

Deslizamientos

Movimientos de una masa de suelo, detritos o roca, que ocurre sobre una superficie de ruptura conocida. Esta superficie de rotura define este tipo de movimiento, la cual se localiza en la zona de escarpe (Figura. 3.).

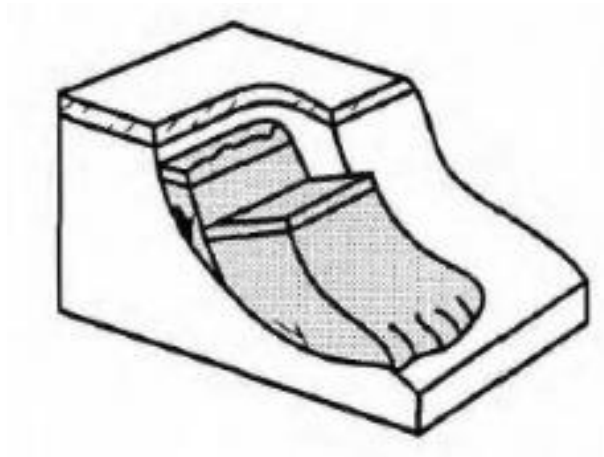


Figura. 3. Deslizamientos (Alcántara, 2000).

Flujos (Flow)

Movimientos continuos rápidos y de poca duración, que origina la formación de lóbulos debido a la heterogeneidad de materiales y distribución de velocidades. Se clasifican según el tipo de material presente, por tanto, se dividen en flujos de rocas (rock flows), flujos o corrientes de derrubios (debris flows) y flujos de arena o suelo (soil flows) (Figura. 4.)



Figura. 4. Flujos (Alcántara, 2000).

Expansiones laterales

Movimientos debidos a la fracturación y expansión de suelos o masas de roca compactados debido a la licuefacción o fluidización del material subyacente, ocurren cuando materiales gruesos o fragmentos de rocas, grava, etc., están inmersos en una matriz de material más fino o arcillas (Alcántara, 2000) (Figura. 5.).



Figura. 5. Expansiones laterales (Alcántara, 2000).

Movimientos complejos

Movimientos que suceden cuando el tipo de movimiento inicial, se transforma en otro al ir desplazándose pendiente abajo. El material involucrado presenta una estructura suelta y alta porosidad, por lo que cuando colapsa, la carga del terreno es transferida a los fluidos de los poros, lo que ocasiona un incremento en la presión de poros y, por tanto, la pérdida de resistencia ocasionando un flujo deslizante (Alcántara, 2000).

El movimiento de masa que se estudia en este trabajo de fin de master es una corriente de derrubios (Debris Flows), y desprendimientos o caídas de rocas (rockfall) (Tabla 1), en la que nos centraremos a continuación en el punto 2.2. y 2.3.

2.2. Corrientes de derrubios (*Debris flows*) y sus características

Los Debris flows son movimientos de masa de gran volumen, compuestos por una mezcla de escombros que involucran agua viscosa y sedimento. Esta mezcla fluye a gran velocidad a través de un canal de corriente incrementando su volumen por erosión del material situado en el lecho. Este tipo de flujos, similar a un líquido viscoso y sin preservar la estructura interna original del material desplazado (Copons, 2009) ocurre en pendientes pronunciadas en áreas montañosas, y se deben ver como fenómenos intermedios entre flujos hiperconcentrados (transporte intenso de cargas de sedimento) y deslizamientos de tierra separados por transiciones bruscas de algunas características (naturaleza del depósito y tipo de flujo). Se presentan dos parámetros principales que son, fracción sólida y tipo de material, que son considerados para una

clasificación en detalle. De este modo se distinguen dos tipos de flujo: Flujos de residuos fangosos y flujos de residuos granulares (Coussot, 1996).

Geomorfológicamente, una corriente de derrubios puede presentarse diferente, aunque generalmente la longitud total del debris flow será mayor que el ancho total. Además, se caracteriza por dividirse en tres partes bien diferenciadas (área fuente, zona de transporte o canal, y zona de acumulación o cono de deyección) (Figura. 6.):

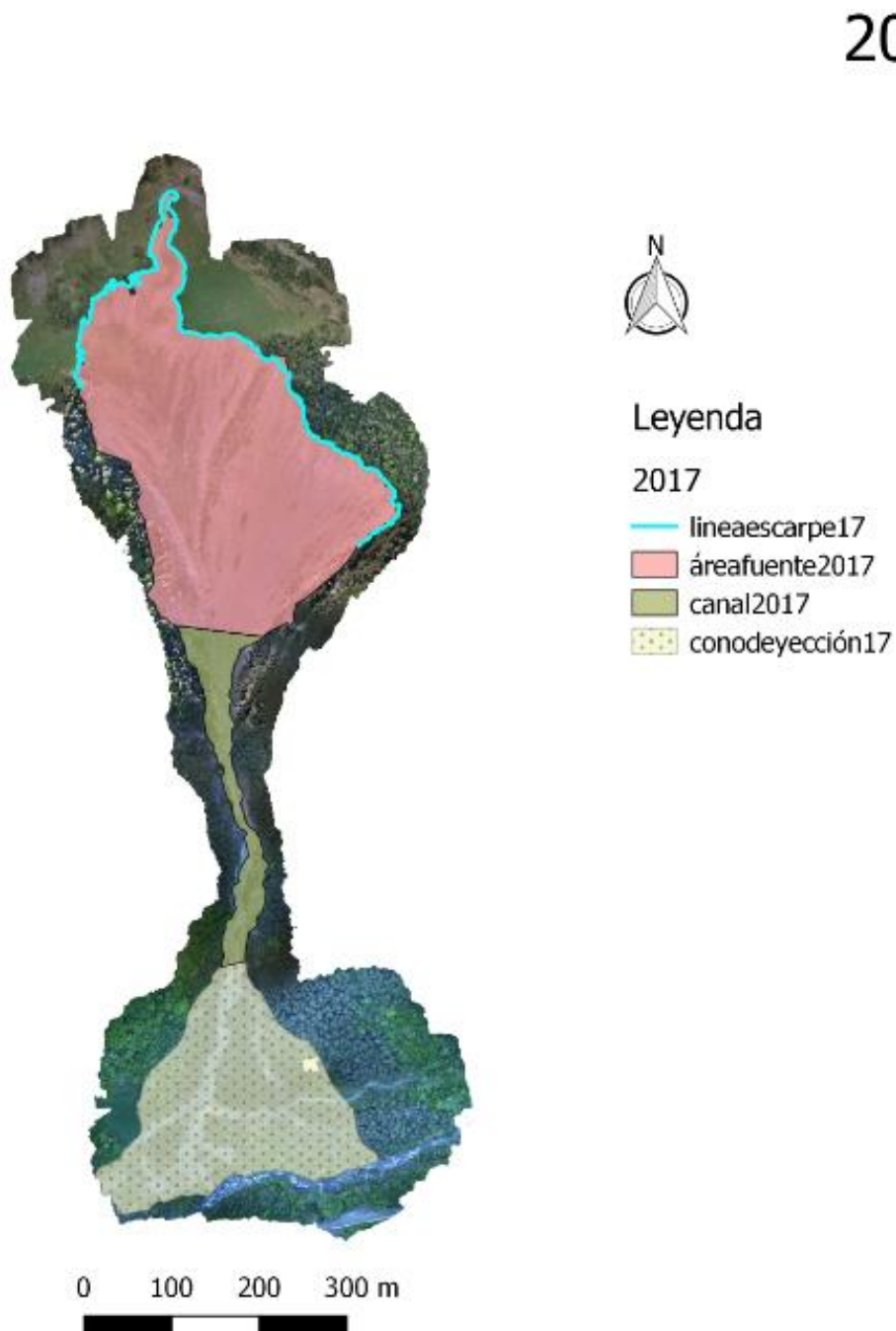


Figura. 6. Zonas geomorfológicas del barranco Rebaixader. Área fuente en rosa, canal en verde, y el cono de deyección en verde claro con puntos.

Área fuente

Áreas de origen del debris flow, caracterizadas por presentar aproximadamente una pendiente entre 20º y 45º, y una longitud \pm 450 metros de ancho, haciéndose cada vez más estrecha adquiriendo forma de embudo. Esta zona, presenta escasa vegetación y está formada por suelos detríticos o meteorizados. Estos sedimentos, se caracterizan por presentar una capa superficial de materiales cohesivos, de diferentes tamaños.

Canal

Zona de transporte del material movilizado en la que la longitud total de la zona de transporte es de 500 metros de largo y 45 metros de ancho, con una pendiente menor a la del área fuente. Hay presencia de diques laterales, generados a lo largo de todo el canal, y formados por elementos de gran diámetro (grava o bloques), definiendo mejor la trayectoria de la corriente.

Cono de deyección

Zona de desembocadura del material movilizado que presenta aproximadamente 320 metros de largo y 330 metros de ancho. En conjunto, se presenta como un abanico formado por un conjunto de lóbulos pequeños. Cabe destacar, que en esta zona no se incorpora material nuevo procedente del canal, ya que el flujo finaliza al perder su masa hasta agotarse.

2.2.1. Factores causantes de los Debris Flows.

Un Debris Flow, se genera por la presencia de un conjunto de factores que están del lado de la inseguridad. De manera general, estos factores se dividen en factores intrínsecos, los cuales corresponden al propio terreno geológico y la pendiente; en factores externos, los cuales corresponden a la climatología, presencia de vegetación y acción antrópica; y factores desencadenantes, los cuales corresponden a el agua, terremotos, procesos erosivos, y acción antrópica (Copons, 2009).

Estos fenómenos causan daños considerables, aunque la causa principal de este efecto son las precipitaciones, manifestándose en lluvias extremadamente fuertes. Los debris flows, normalmente tienen lugar por el aumento de la presión de los poros debido a la lluvia de alta intensidad, o deshielo rápido con la subsiguiente saturación y rotura de los materiales de pendiente (Boelhouwers, 2000).

A parte, existen una serie de requisitos previos para la aparición de los mismos (Boelhouwers, 2000):

- Pendientes pronunciadas cercanas al ángulo de reposo.
- Disponibilidad de materiales sujetos a movilización.
- Humedad para saturar y movilizar el material.

2.3. Desprendimientos o caída de bloques (rockfall) y sus características

Los desprendimientos o caídas de bloques (rockfall), son movimientos de masa rocosa y del material no consolidado en caída libre, rápidos, y difíciles de predecir en el tiempo, ya que ocurren de manera instantánea.

Generalmente, los bloques de roca desprendidos se fragmentan debido a la caída de los mismos. Los fragmentos originados presentan varios tipos de trayectoria, y el bloque puede caer libremente, saltar, rodar, rebotar, o incluso presentar una combinación de las anteriores. De manera general, el conjunto de estos bloques se acumula en la base de la pendiente, aunque, concretamente los bloques se depositan según una clasificación gravitacional.

Los principales factores que favorecen la formación de desprendimientos son, las grandes pendientes topográficas, y las precipitaciones. Normalmente, se producen en episodios de lluvias fuertes y de corta duración o debido al propio deshielo. Estos tres factores son muy comunes en nuestra zona de estudio, el barranco Rebaixader. Sin embargo, la presencia de vegetación en el propio barranco, como son los matorrales, frena la trayectoria de los bloques desprendidos.

Finalmente, cabe destacar la estrecha relación entre estos dos movimientos de masa que ocurren en el barranco de Rebaixader, ya que, en la mayoría de corrientes de derrubios (Debris flows) también se originan desprendimientos.

3. ZONA DE ESTUDIO

3.1. Localización geográfica

El área en el que se desarrolla el presente trabajo está en Senet de Barrabés una entidad local ubicada al Noreste de la Península Ibérica en el municipio de Vilaller, en la comarca de la Alta Ribagorza, en la provincia de Lérida (Cataluña, España). Concretamente, la zona de estudio se encuentra entre Senet de Barrabés y Aneto, y la manera de acceder es a través de un camino rural asfaltado con la carretera nacional N-230 (Figura. 7.).

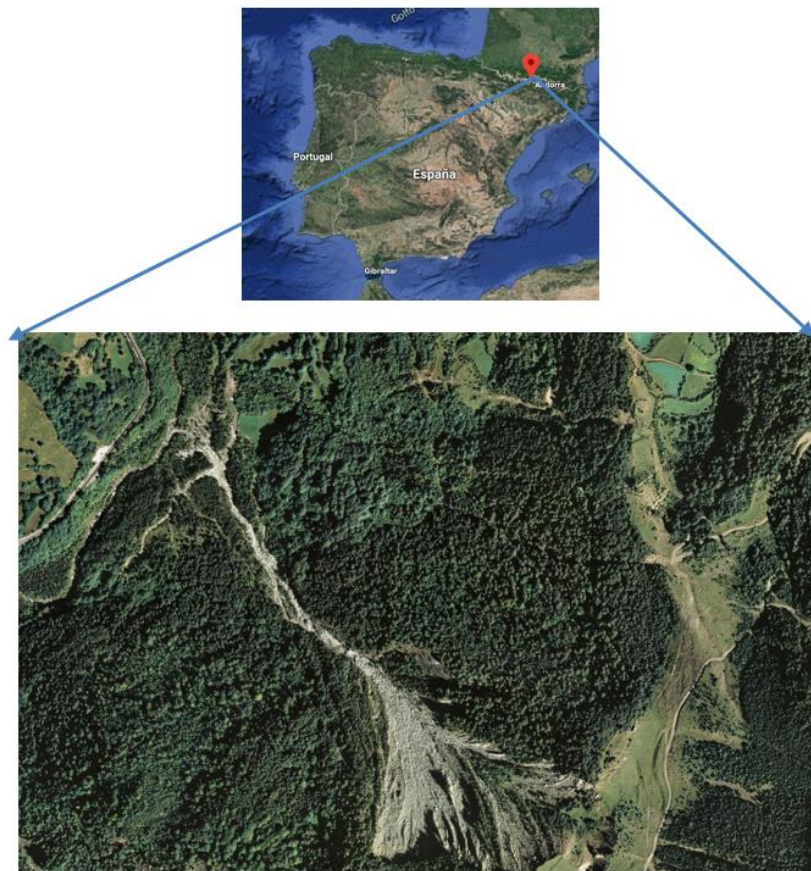


Figura. 7. Localización de la zona de estudio señalada con una flecha roja, la cual está situada entre los pueblos de Senet de Barrabés y Aneto. (Google Maps, ortofoto de 2011)

En la siguiente figura (Figura. 8.), se puede observar la topografía del área de estudio en detalle.

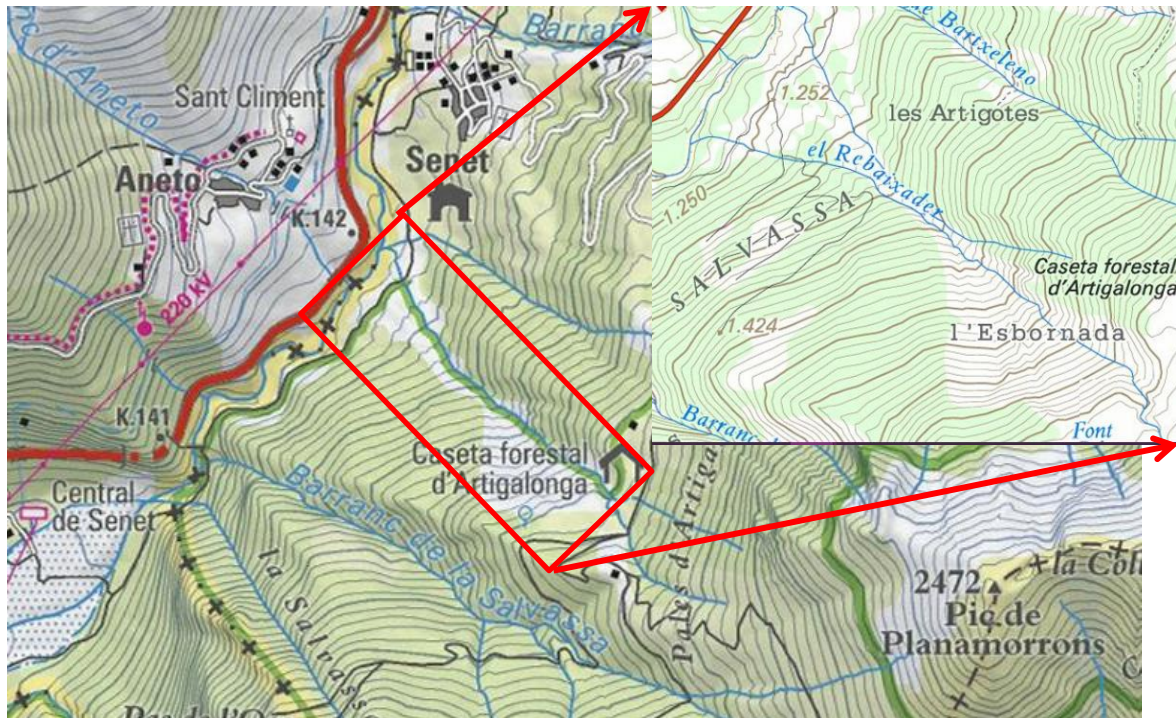


Figura. 8. Mapa topográfico de la zona de estudio a una escala de 1: 5.000 (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, ICGC).

3.1.1. Geología de la zona

El área de estudio que engloba el presente trabajo, se encuentra en la zona axial del Pirineo Central, y pertenece a etapas de deformación correspondientes respectivamente a los ciclos hercínico y alpino. En el hercínico, se produjeron sobre todo plegamientos acompañados de esquistosidad, de metamorfismo y de intrusión de grandes masas calientes graníticas, mientras que posteriormente en el alpino priorizan las condiciones frías, y la deformación pasa a ser un segundo plano. En esta zona afloran rocas ígneas y metamórficas, concretamente pizarras y filitas, y las formaciones superficiales son depósitos glaciares o till.

Geomorfológicamente, dominan los relieves pre-glaciales, en la acción de los hielos cuaternarios y procesos fluvio- torrenciales actuales. Como rasgos morfológicos resultantes de la acción glacial cuaternaria se han establecido:

- Valle glacial: Presentan forma en “U”, y tienen su origen en el proceso erosivo de fondo y lateral provocado por los hielos de los antiguos glaciares, en las que el perfil y la continuidad presentan discusiones y controversias (Vilapalana, 1983) y depende básicamente del sustrato, de la dinámica glacial y de las modificaciones posteriores.
- Cordón morrénico: Se identifican sobre el terreno por la forma y se encuentran ligadas a los depósitos morrénicos.

La relación y caracterización de los depósitos presentes en la cartografía se encuentran los depósitos morrénicos, que han dado lugar a importantes roturas generando corrientes de derrubios y formación de importantes conos de deyección. (Cambray, 1991) (Figura. 9.).

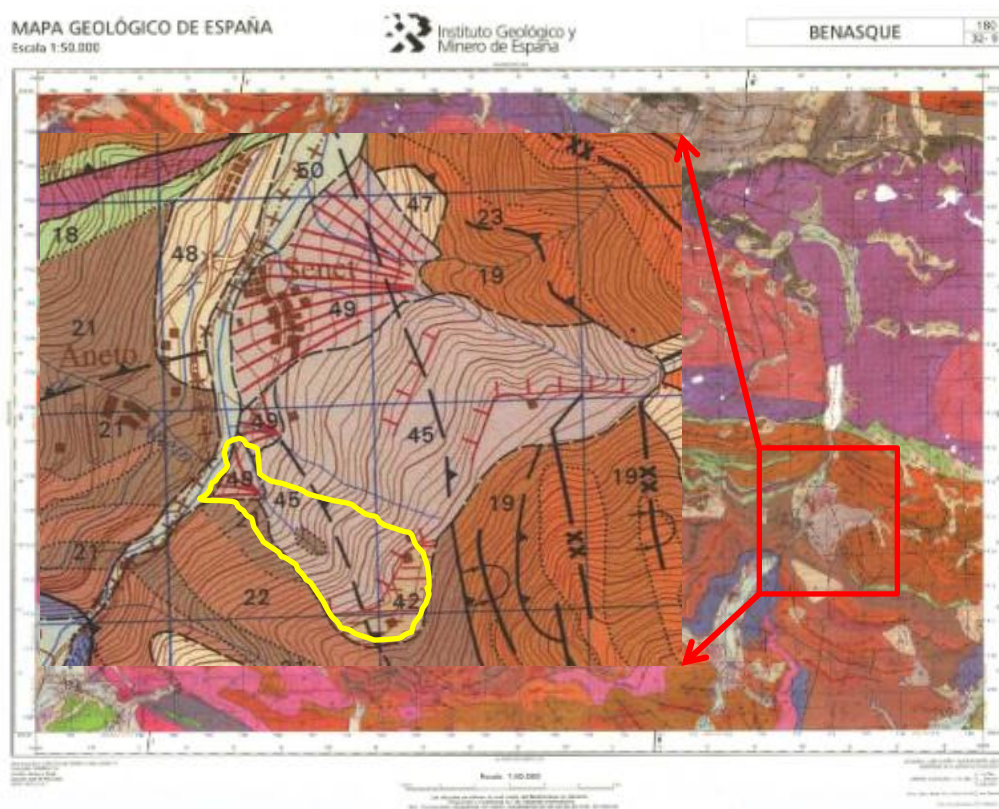


Figura. 9. Mapa geológico del IGME general correspondiente a la MAGNA 50- Hoja 180 (BENASQUE, 32-9) mapa editado escaneado, en el que se muestra en detalle el área de estudio. (IGME, 1991).

Desde el punto de vista geológico, el sustrato rocoso de la zona de estudio involucra materiales pertenecientes al Fanerozoico, en el que se encuentran materiales del Paleozoico superior concretamente del Devónico inferior, y materiales del Cuaternario (Figura. 10.). A continuación, se pueden diferenciar las siguientes unidades ordenadas de más antigua a más moderna.

La unidad más antigua, perteneciente al Devónico inferior, presenta las siguientes formaciones:

- La formación Aneto (21), principalmente presenta materiales de pizarras gris oscuras, con tramos en los que aparecen intercalaciones de caliza arenosa y areniscas calcáreas, tramos que recuerdan a las facies de la pizarra. El espesor de esta formación puede sobrepasar los doscientos metros.
- La formación Gelada (22), está formada por marga calcárea gris con un contenido importante de arcilla y arena fino o limo. La potencia que presenta es del orden de 40-50 metros.

En el cuaternario, se encuentran depósitos pertenecientes a las formaciones superficiales constituidas por:

- Depósitos de obturación glaciár (42), cordones morrénicos recientes (45), acumulaciones caóticas de bloques transportados, con estrías y restos de la acción glaciár, englobados en una matriz arenosa con cierta fracción de finos y con ciertas estructuras de flujo.
- Conos de deyección (49), principalmente presentar sedimentos gruesos, en la salida de los barrancos. Generalmente, conectan con los depósitos aluviales actuales.

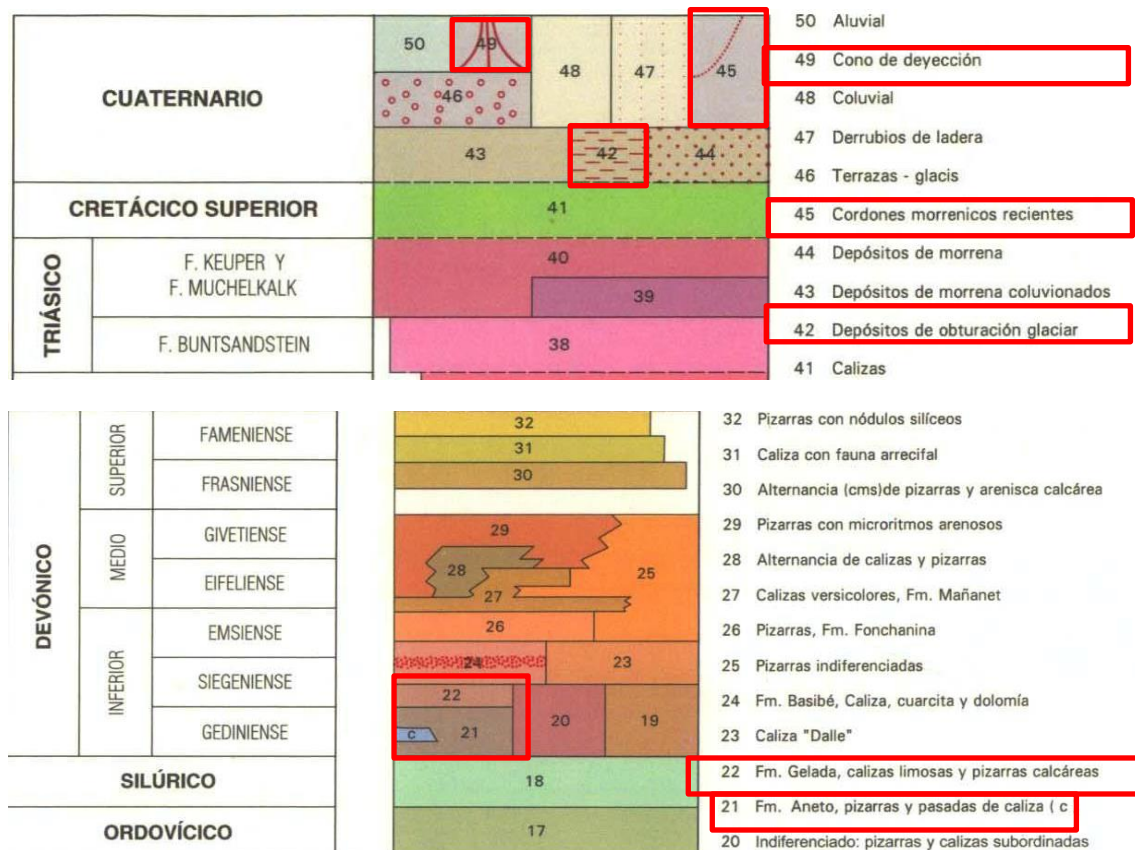


Figura. 10. Leyenda de los materiales presentes en la zona de estudio, perteneciente al mapa geológico del IGME general correspondiente a la MAGNA 50- Hoja 180 (BENASQUE) (IGME, 1991).

3.1.2. Trabajos previos

El barranco de Rebaixader, ha sufrido diversos eventos de inestabilidad y desprendimiento de bloques a lo largo de los últimos años debido a las intensas precipitaciones ocurridas en la zona, y el deshielo en épocas de primavera, suponiendo efectos importantes sobre el territorio y la población de Senet.

En el año 1963, al norte del área de estudio, concretamente en el barranco de Senet, se produjo un fuerte debris flow a causa de intensas lluvias, generando consecuencias geomorfológicas que se tradujo en el desencadenamiento de una avenida torrencial en el barranco. El flujo erosionó la base de la ladera del barranco, incorporando sedimentos a medida que avanzaba a gran velocidad, movilizandolos unos 50000 m³ de material. Al desembocar el flujo al final del barranco, este obstruyó el Río Noguera Ribagorçana, originando una presa natural y provocando la retención de las aguas del río. Horas después, la presa cedió provocando una fuerte riada aguas abajo, quedando acumulada una capa de sedimentos finos por encima de la vegetación (Bolaño, 2008).

A partir de este momento, se empieza a estudiar la zona de manera amplia, incorporando el barranco Rebaixader en el año 2009, el cual es objeto de estudio de este trabajo de fin de máster, con el fin de evitar riesgos geológicos, disponiendo cada año de mayores recursos tecnológicos y más seguros.

Se han realizado diversos estudios previos en la zona desde el año 2011. En un primer lugar se realizó la estimación de la magnitud de procesos torrenciales y corrientes de derrubios mediante la monitorización e interpretación del barranco (Hürlimann et al., 2011), tratando de cuantificar el volumen de sedimento movilizado. Con los resultados obtenidos se observó que el método funcionaba bien.

A raíz de las precipitaciones intensas que desembocaron dicho debris, en el 2012 se llevó a cabo el monitoreo de la humedad y de las presiones intersticiales en un depósito de origen glaciar y su efecto en la formación de roturas superficiales. Concretamente, la aplicación se ejecutó en un till en Senet (Madrid Vergara, 2012).

A partir de todos los datos y resultados recopilados en el 2013 se llevó a cabo la estimación de la magnitud- frecuencia de corrientes de derrubios mediante técnicas geomáticas. En esta aplicación a la cuenca de Rebaixader (Pirineo Central) (Bonet marcé, 2013), se inició el proceso para calcular el volumen erosionado mediante técnicas geomáticas de manera que, lo que se calculase no fueran los episodios de erosión sino los cambios producidos en el barranco.

Las técnicas geomáticas empleadas fueron un láser y un escáner terrestre (láser TLS), y analizados los datos obtenidos, se pudo observar que el método utilizado tuvo algunas deficiencias debido a la morfología del terreno. La morfología del terreno, únicamente permite estacionar el aparato de medida en la vertiente opuesta, y en la parte superior del barranco. Estas dos ubicaciones no fueron las más recomendadas.

El mayor problema detectado fueron los huecos generados por la presencia de vegetación, que se interponen entre el aparato y la zona activa del canal y los generados por la propia morfología del barranco.

A partir de esto, se proponía obtener datos desde el aire, lo que se denomina fotogrametría UAS (Unmanned Aerial System), con el fin de disminuir las áreas vacías de los modelos realizados.

Estos equipos permitirían seguir la geomorfología del barranco, realizando todos los fotogramas necesarios para obtener un modelo de elevaciones del terreno, al poder tomar las medidas desde el aire y desde múltiples ubicaciones, permitiría disminuir el porcentaje de huecos de los modelos obtenidos y un porcentaje de resolución más alto. Por ello, se realizó un estudio de resultados y experiencias recogidas en la zona de monitoreo de flujo de escombros en el barranco de rebaixader, pirineos centrales, España (Hürlimann et al., 2014).

Este artículo se centró en los análisis de datos registrados y observaciones de campo. Se deduce y confirma, que la captación del barranco de Rebaixader parece ser un sitio ideal para el monitoreo de flujos de escombros debido a la alta frecuencia de eventos. La relación magnitud-frecuencia acumulada, que fue establecida para los flujos de escombros y las inundaciones de escombros observadas durante los primeros 4 años, indicó que grandes eventos de miles de metros cúbicos se puede esperar cada año.

Debido a estas características geomorfológicas de la zona, como la frecuencia de los eventos y la dificultad de colocar un sistema de monitoreo se ha realizado un trabajo de fin de máster anterior al actual relativo al uso del dron para la cartografía y el análisis geomorfológico de procesos torrenciales. experiencias de la cuenca el rebaixader (pirineo central) (Vallés González, 2017).

Con ello, se quiso mostrar que el uso del dron supone un avance para el estudio del barranco de Rebaixader, tanto por la comodidad que supone trabajar con él, como por el ahorro económico que supone respecto a la realización de una ortofoto realizada con fotografías aéreas. Lo principalmente importante, es la resolución que se obtendrá con el dron debido a su vuelo de baja altitud, llegando a concluir que el dron es el futuro del estudio geomorfológico.

Con este trabajo, se pudo observar que el barranco ha tenido una actividad considerable durante la última década estudiada. A pesar de la baja calidad de las ortofotos de los años 2008 y 2013, se ha conseguido obtener unos resultados lógicos llegando incluso a ver casos enteros de movimientos de bloques de gran tamaño. No se dispone de foto del año 2014, la cual hubiera

sido adecuada para poder comparar los debris flow producidos entre los años 2013 y 2014. Por ello, los cambios producidos entre los años 2013 y 2016 son tan grandes.

En este trabajo, se dividieron los bloques según el tamaño (S, M, L, y XL). En las rocas tipo S y M, se observó que en los debris flow más recientes, se llegaron a movilizar hasta el doble de bloques que en los debris flow producidos entre los años 2009 y 2011. Estos mismos llegaron a movilizar más de diez bloques tipo L y en el caso del debris flow de 2012 se llegaron a movilizar 4 bloques clasificados como XL.

Se destacó un cambio importante detectado en el cono de deyección (Figura. 11.). A pesar de que la pendiente no es muy pronunciada en esa zona hay que tener en cuenta los bloques que se encuentran estancados en la entrada. Con un nuevo episodio de debris flow de grandes dimensiones, estos bloques podrían estar complementados con los modelos digitales de elevaciones para un estudio superior al de esta tesis, y así poder realizar un análisis sobre la erosión que ha sufrido la zona de estudio durante los últimos años.

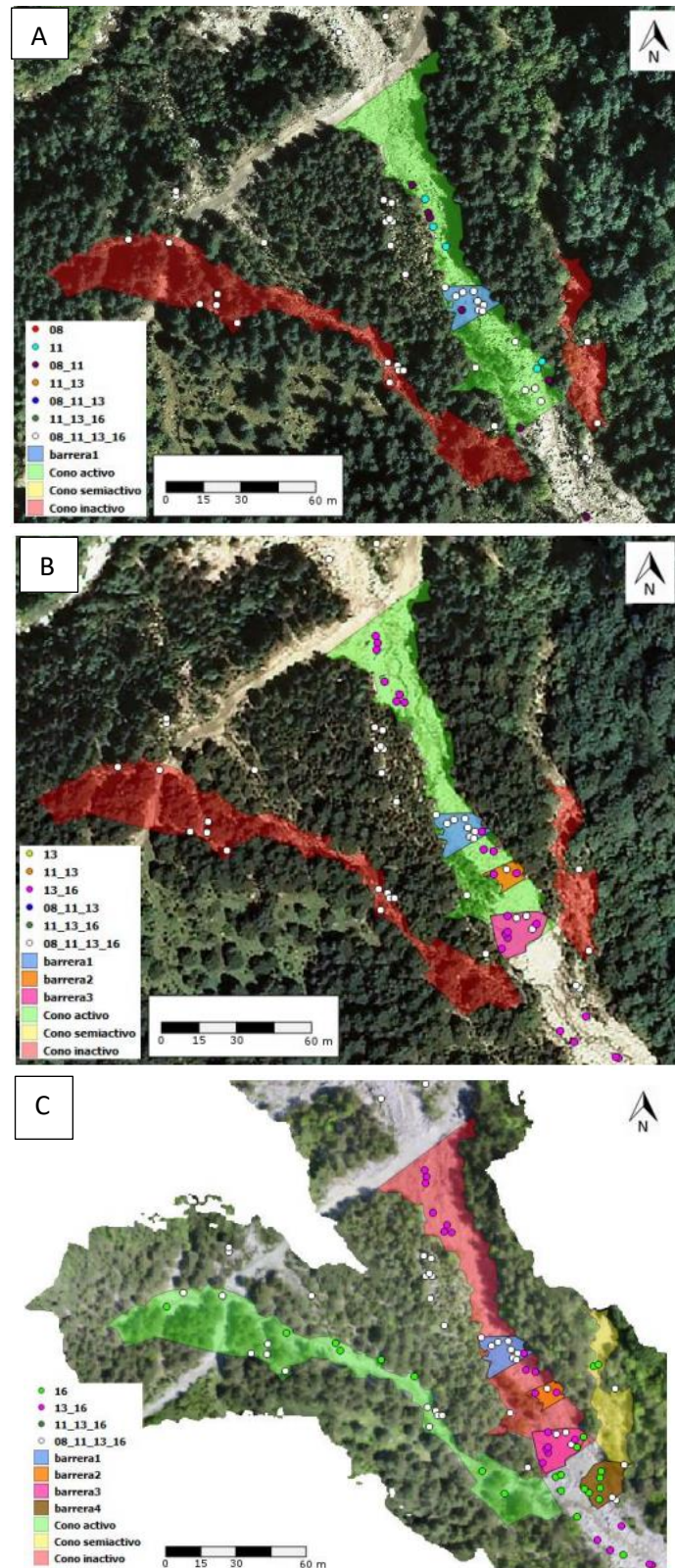


Figura. 11. A) Mapa con la actividad en el cono de deyección durante año 2011. B) Mapa con la actividad del cono de deyección, año 2013. C) Mapa con la actividad del cono de deyección del año 2016. En general, los puntos que se ven representados muestran bloques de rocas que se han tenido en cuenta durante la realización de la tesis. Los números asociados a estos son el año o los años en los que el bloque se encontraba en esa posición. La capa barrera es una representación de un espacio ocupado por una acumulación de bloques los cuales pueden llegar a obstruir el cono en el que se hallan. El color de los conos de deyección es una referencia respecto la actividad que tienen estos en el momento de estudio (Vallés González, 2017).

A partir de este trabajo realizado por Vallés González (2017), se va a seguir estudiando la zona, en este trabajo de fin de master, en el que se van a incorporar nuevos resultados y avances.

3.2. Instrumentación del barranco

La zona de estudio cuenta con una instrumentación que se encuentra instalada en el propio canal del barranco. Los sensores instalados se pueden agrupar en tres estaciones; una estación de sensores meteorológicos (Abancó, 2011), utilizados con el objetivo de analizar las condiciones de formación de las corrientes de derrubios. Estos sensores detectan temperatura y precipitaciones; una estación de flujo, utilizados para observar el comportamiento dinámico de las corrientes (Abancó, 2011), con el objetivo de medir la vibración del terreno, movimientos del terreno y tipología; una estación de sensores que controlan la infiltración en el área fuente de las corrientes (instalada en 2012) (Abancó, 2011), aunque actualmente no se tiene en cuenta.

En conjunto la instrumentación del barranco cuenta con (Figura. 12):

- Cuatro geófonos, aparatos que tienen como objetivo medir desplazamientos, velocidades y aceleraciones, así como, transformar un movimiento en una señal eléctrica para poder diferenciar los diferentes procesos que hay en el barranco, como pueden ser, desprendimientos, debris flow y debris flood.
- Un ultrasonido, que mide la distancia que hay entre el aparato y el bloque más cercano en una dirección determinada.
- Una cámara, que tiene la función realizar una foto diaria con el fin de observar variaciones o no en el canal.
- Una estación meteorológica, cuya función es registrar frecuentemente datos meteorológicos, en concreto, la estación meteorológica instalada en el barranco es un pluviómetro, cuya función es medir la cantidad de precipitación caída en un período de tiempo determinado.

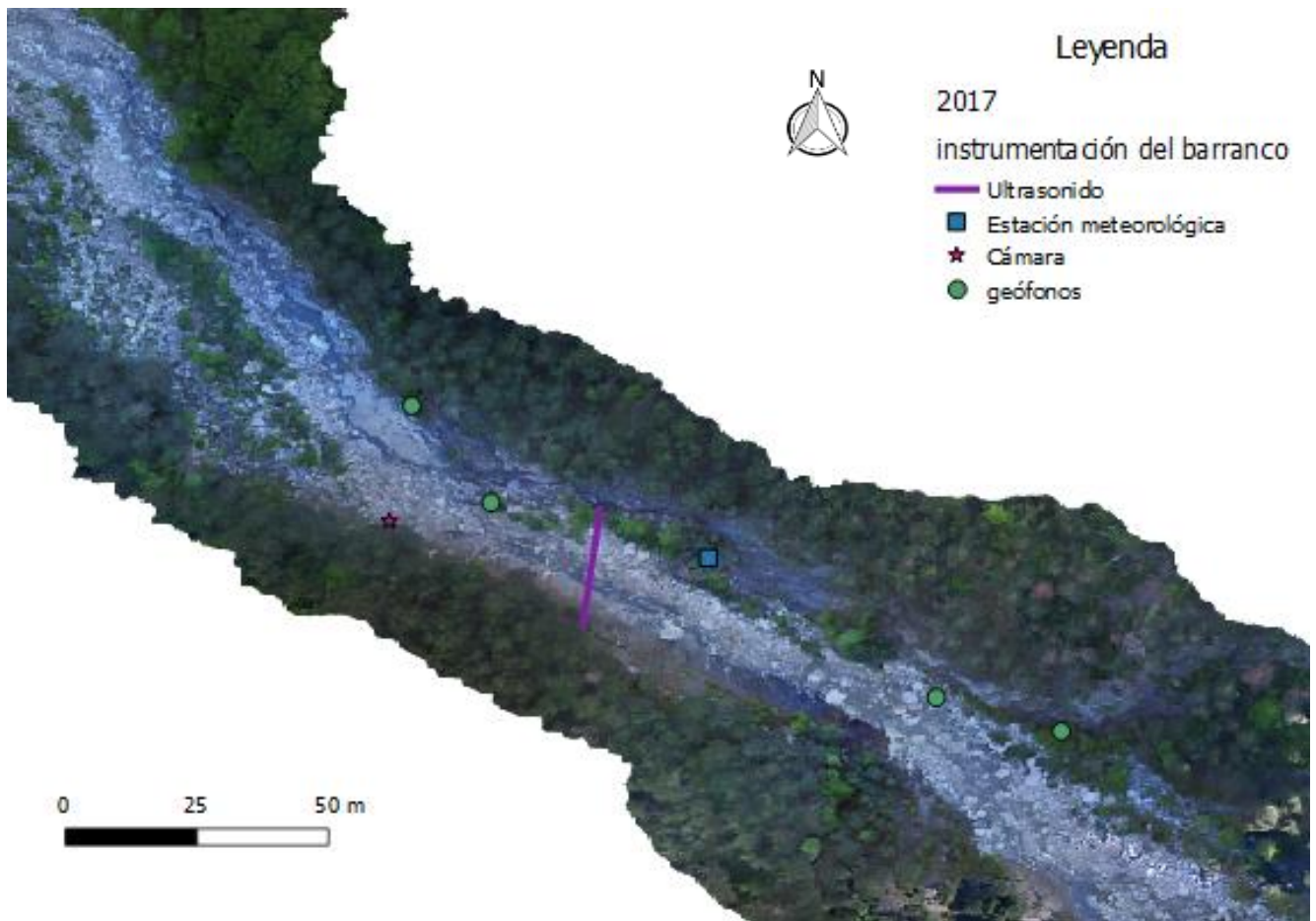


Figura. 12. Ortofoto del barranco con la correspondiente ubicación de los aparatos instalados en el barranco que forman la instrumentación del mismo.

A parte de la instrumentación instalada en el barranco, es importante destacar la presencia de un instrumento fundamental en este trabajo, el dron o UAV (vehículo aéreo no tripulado), el cual se explicará en el siguiente apartado (Apartado 4.1. Fase de estudio).

4. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el estudio de la zona, y verificar todos y cada uno de los resultados que se van a obtener, es necesario ejecutar una serie de pautas para llegar a cumplir todos y cada uno de los objetivos que se quieren conseguir. En este punto se explica de manera detallada cada uno de los procesos realizados, por ello, se va a desarrollar en 4 fases para seguir un procedimiento ordenado, el cual se divide en (Figura. 13.): 1) Fase de estudio de la zona, en la que tiene toma de contacto con la zona de estudio, y en la que se diseña el plan de vuelo del dron. 2) Fase de campo, en la que se trabaja de manera directa en la zona de estudio, donde se procede a ejecutar el vuelo y por medio del vuelo, se adquieren las fotografías. 3) Fase de gabinete, en la que se lleva a cabo el tratamiento de datos, para llevar a cabo la fotogrametría mediante las fotos obtenidas. 4) Fase de post-procesado, en la que se trabaja con los programas necesarios para llevar a cabo el análisis exhaustivo y definitorio de la zona de estudio.

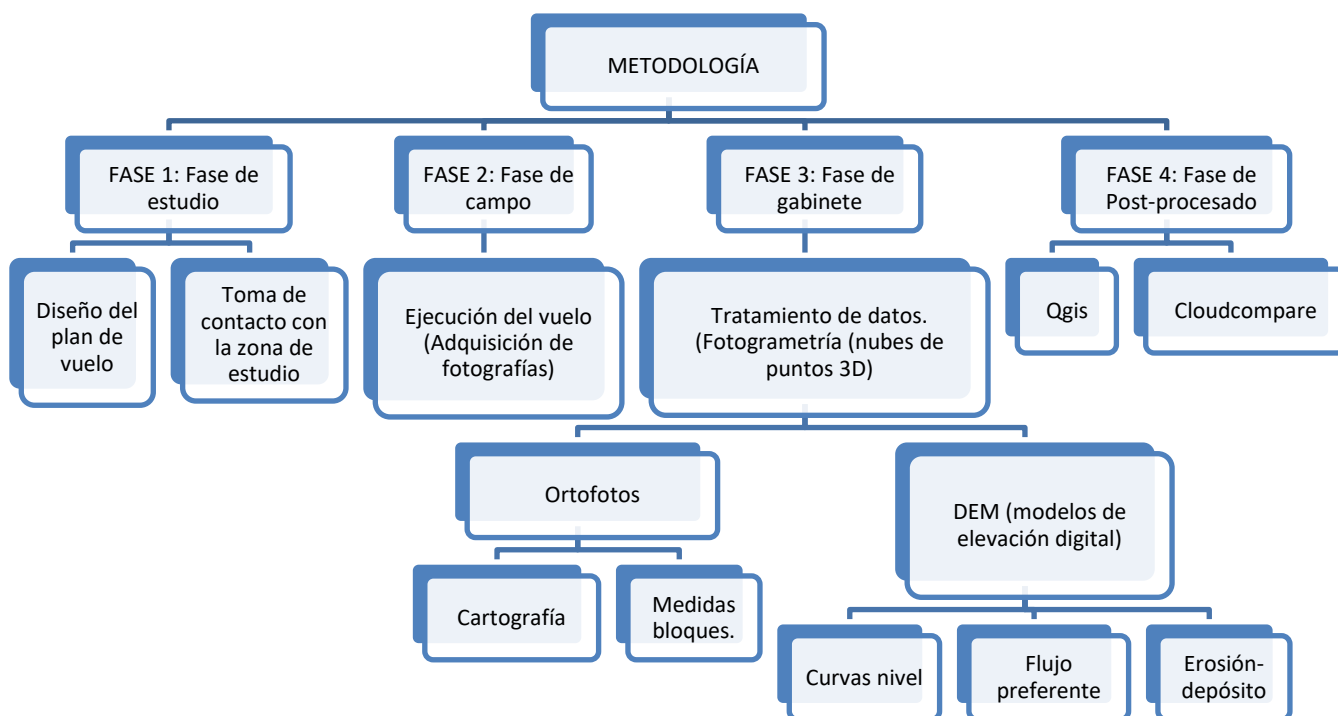


Figura. 13. Resumen de la metodología que se va a seguir en el correspondiente trabajo de fin de master.

Las fases se van a llevar a cabo en los siguientes puntos.

4.1. Fase 1: Fase de estudio

En esta fase, se diseña el plan de vuelo del dron, que se va a realizar posteriormente en la zona de estudio, el cual tendrá un recorrido específico con el fin de abarcar todo el barranco.

“El dron o UAV es una aeronave a propulsión, no tripulada y reutilizable que opera mediante control a distancia y autónomamente” (Addati, 2014). El dron tiene por finalidad la obtención de datos geoespaciales, y presenta un conjunto de características compatibles con la ciencia y la ingeniería civil.

Existen diferentes tipos de drones dependiendo del tipo de misión u objetivo y son básicamente, el dron de ala fija, y el dron de ala rotativa. En el caso de nuestro estudio, necesitamos un dron que realice maniobras en forma estacionaria y a baja velocidad, para obtener una ortofoto con gran resolución y en detalle, por ello, utilizamos un dron de ala rotativa. La gran desventaja es que tienen menor tiempo de vuelo que los de ala fija. Concretamente, para este estudio también se realizan una serie de vuelos con UAV para permitir la obtención de un modelo digital de elevaciones (DEM) de muy buena calidad (Ruiz-Carulla et al., 2017).

El pilotaje de este dron requiere según la Ley 18/2014, un certificado de piloto específico, certificados médicos, seguro de responsabilidad civil y creación de una operadora de vuelo (Ruiz-Carulla et al., 2017).

Este dron (Figura. 14.), pesa menos de 25 kg, consta de una cámara para la toma de fotografías, y se estima que la escala y la georreferenciación obtenida presenta un error de entre 1 y 10 metros. Cabe destacar, que “dispone de un sistema de posicionamiento satelital, y de un sistema inercial controlados por un “cerebro” que les permite pilotarse de forma autónoma, realizando recorridos y tareas programadas” (Ruiz-Carulla et al., 2017).



Figura. 14.Dron utilizado para crear la última ortofoto de noviembre de 2018.

Este dron, se caracteriza por realizar un vuelo a una altitud por debajo de los 120 metros, lo que nos va a permitir obtener una resolución muy alta. La altura de vuelo se va a combinar con la velocidad del vuelo, y la frecuencia temporal de disparo para garantizar un solapamiento perfecto entre imágenes para permitir la corrección fotogramétrica entre pares de imágenes (Vallés González, 2017).

En la siguiente figura (Figura. 15.), se muestra la trayectoria a seguir por el dron durante el vuelo.

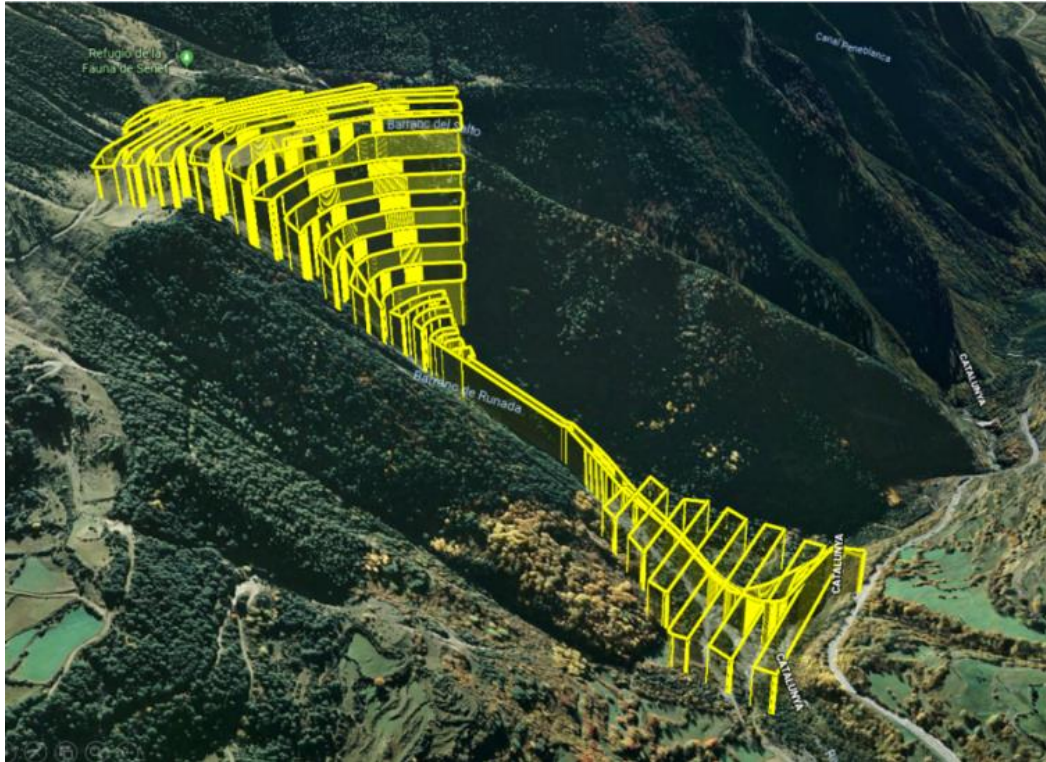


Figura. 15. Trayectoria de vuelo ejecutada en el área de estudio. (Carulla, 2018).

El trabajo, empieza con una revisión generalizada de los mapas correspondientes al área de estudio, tanto geológicos como geográficos. Este método, se realiza con el fin de disponer de un conocimiento previo de la geología general de la zona de estudio que presenta el propio entorno.

Además, se ha recurrido a trabajos previos para tener conocimiento de los antecedentes (apartado 3.1.2. Trabajos previos) que caracterizan el Rebaixader de ser un debris flow tan importante, como para disponer de varios equipos de trabajo.

Todo ello, ha ido acompañado de una búsqueda bibliográfica sobre el área de estudio y lo relacionado con ella.

4.2. Fase 2: Fase de campo

El estudio se realiza de manera directa, in situ, a la que se acude de primera mano para observar la zona, y realizar el vuelo correspondiente a la ortofoto de noviembre de 2018 (Figura. 16.). Para obtener la ortofoto, se ejecuta el vuelo con el dron, que tendrá un recorrido específico (Figura. 15.) previamente planificado, y una duración de aproximadamente 4 horas.



Figura. 16. Fotos tomadas en noviembre de 2018, para realizar el último vuelo de dron. La foto superior, se localiza en la zona alta del barranco para ejecutar la fase 3 del vuelo (Figura.17.), y la foto inferior se localiza en la zona baja del barranco para ejecutar la fase 1 y 2 del vuelo (Figura.17.) en la que se puede observar el inicio del vuelo del dron.

El vuelo se realizará en fases (Figura. 17.), ya que la autonomía de la batería del dron es limitada, de unos veinticuatro minutos aproximadamente, aunque se hacen dieciocho por seguridad, lo que obliga a dividirla en 3 fases de vuelo.

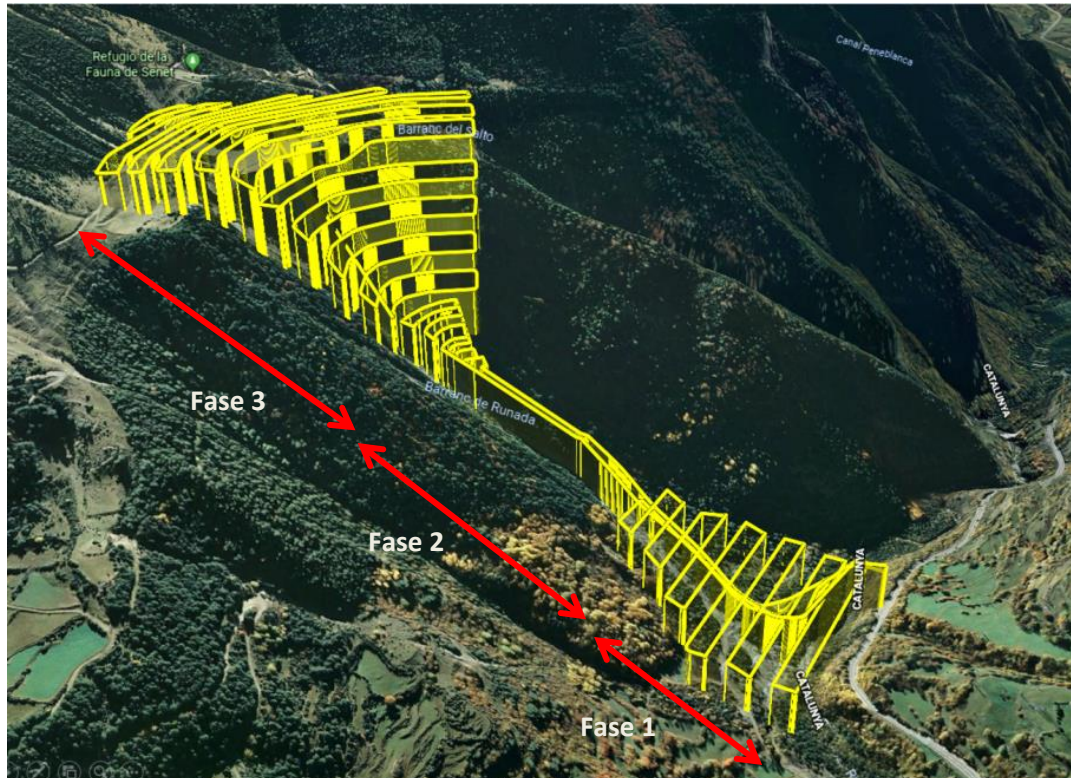


Figura. 17. Trayectoria de vuelo ejecutada en el área de estudio. (Carulla, 2018)

El plan de vuelo para la generación de ortofotos va a seguir una trayectoria en concreto, y será la de forma de cuadrícula que se puede ver en la Figura. 17.. Los solapes mínimos son entre 75% el frontal, y al menos el 60% (lateral) (Figura. 18.). La posición de la cámara estará totalmente perpendicular apuntando al suelo (plano cenital) (Aerial insights).

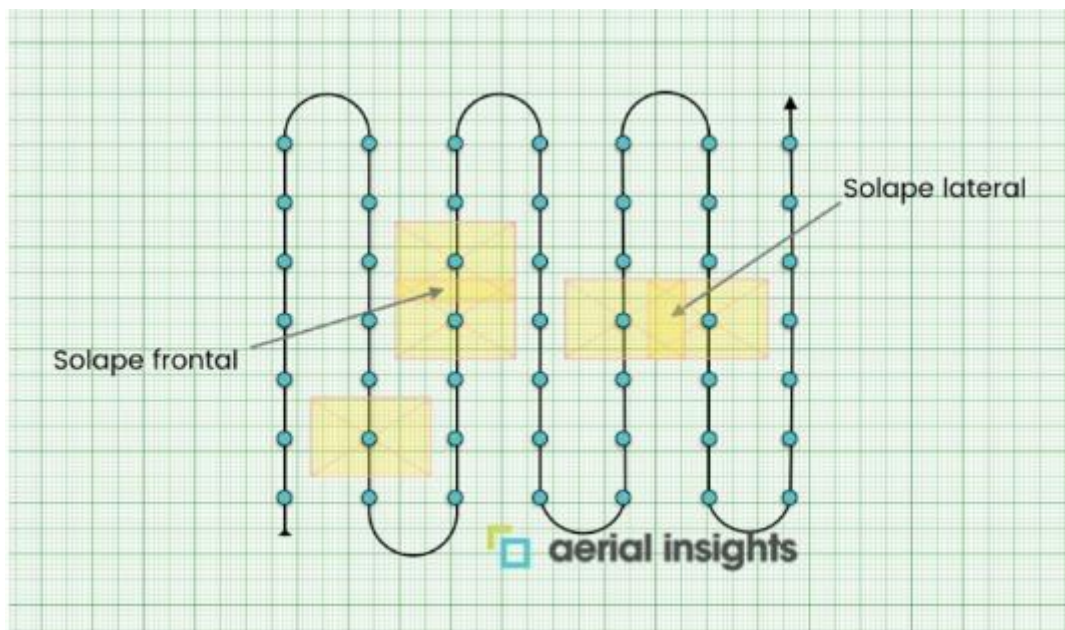


Figura. 18. Trayectoria de vuelo general que se ha seguido para obtener una ortofoto (Aerial insights).

4.3. Fase 3: Fase de gabinete

La obtención de datos, requiere un conjunto de pasos principales que serán necesarios para conseguir, con la mayor precisión, la ortofoto deseada para poder trabajar con ella en los softwares.

Para una buena planificación, el primer paso que se lleva a cabo es el vuelo de dron (apartado 4.2. Fase de campo), siendo este el factor que más influye a la hora de darle calidad a la generación de mapas. En todo caso, cuanto mejor sea el trabajo del piloto, en este caso Roger Ruiz, mejor será el producto final.

Hay tres aspectos clave a la hora de realizar fotogrametría con drones que serán: la trayectoria de vuelo, el solape entre las imágenes, y la posición de la cámara. Estos tres elementos, son importantes para tener un número mínimo de fotografías. Cuanto más variados y numerosos sean los puntos de vista, más abundancia de información útil tendremos.

Por ello, una vez realizado el vuelo, se cargan las fotos en el programa Agisoft Photoscan, que es un software que procesa imágenes digitales y, mediante la combinación de técnicas de fotogrametría digital y visión por el ordenador, genera una reconstrucción 3D del entorno. Actualmente, es el software más utilizado para estudios geomorfológicos (James et al., 2017). Con este programa, vamos a obtener ortofotos georreferenciadas de alta resolución y modelos digitales de terreno (PhotoScan, 2013). Para obtenerlas, se van a ejecutar una serie de pasos (Figura. 19.):

1. Cargar fotos (georreferenciadas en metadatos) obtenidas en el vuelo de dron.
2. Alinear fotos. Se van a relacionar las fotos realizadas en el vuelo y se van a buscar los mismos puntos.
3. Puntos de control (Componentes X, Y, Z de precisión de medición)
4. Optimización.
5. Densificación (Coincidencia de imágenes).
6. Clasificación de suelo y vegetación.
7. Exportar foto. Para obtener ortofotos de la mayor calidad posible se selecciona el formato TIFF (Molina García, 2016).

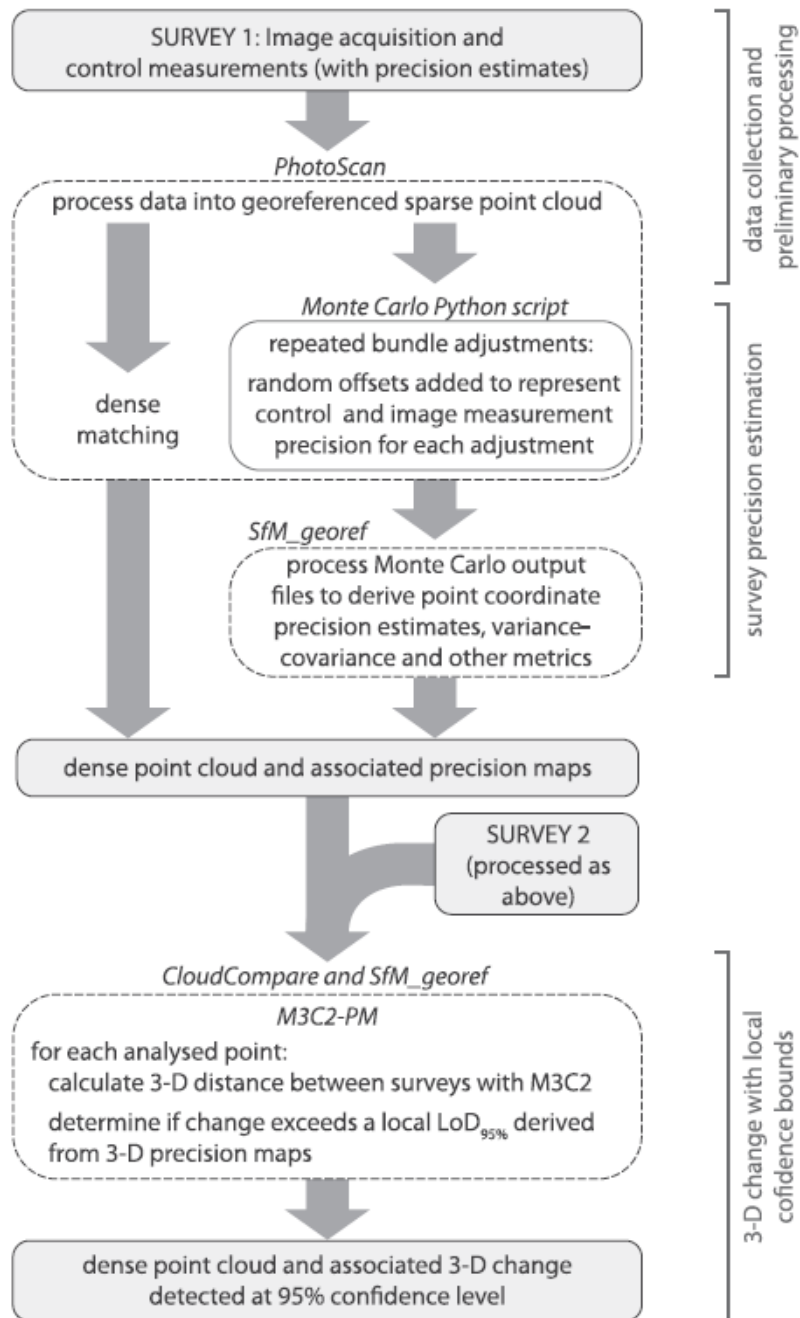


Figura. 19. Esquema de cómo obtener ortofotos georreferenciadas de alta resolución (James et al. 2017).

Como el trabajo se centra en el estudio geomorfológico del barranco de Rebaixader con el fin de observar la erosión producida con el paso de los años, es necesario disponer de los siguientes mapas:

- Ortofotos correspondientes al año 2016 y 2017, realizadas a partir de las fotografías obtenidas con el dron de la UPC, con una resolución de 5 cm/píxel.

- Ortofotos correspondientes al año 2018 JUN y 2018 NOV, realizadas también a partir de fotografía del dron de la UPC, con una resolución de 5 cm/ pixel.

Es importante trabajar con materiales de las mismas características, en este caso, con ortofotos de la misma resolución, ya que posteriormente se van a utilizar en detalle en el programa Qgis para llevar a cabo los objetivos de este trabajo (apartado 1.2. Objetivos).

Para llevar a cabo los objetivos, es necesario realizar una cartografía en detalle, y una medida de bloques para obtener volúmenes deseados y las distribuciones fractales, que se obtendrán mediante la siguiente fase con el programa Qgis. Posteriormente, se vencerán los datos en un Excel para graficarlos.

También, mediante los DEM (modelos de elevación digital) obtenidos a partir de las alineaciones realizadas de cada zona con el programa CloudCompare, se van a obtener, las curvas de nivel, contornos de flujo preferente de cada año, perfiles, mapas de pendientes, y la erosión-depósito producida en cada año. Estas funciones serán visibles en el programa Qgis.

4.4. Fase 4: Fase de Post-procesado (Qgis, CloudCompare).

Para el estudio de la tasa de erosión-depósito del barranco es interesante separar dicho barranco por zonas para poder detectar las zonas con mayor actividad de erosión, y hacer un estudio más profundo de estas.

Para ello, se van a utilizar el programa Qgis (versión 2.14.11.) y el programa Cloudcompare (versión 2.11. alpha).

El programa Qgis, se define como un sistema de información geográfica. Este programa, es una colección de herramientas que permiten procesar, analizar y representar en forma gráfica datos espaciales (Lancelotti,2015). Este programa, va a tener un papel fundamental por excelencia en este trabajo de fin de master ya que, a partir de él, se cumplirán los objetivos de este trabajo porque se visualizarán prácticamente todos los resultados obtenidos.

El programa CloudCompare, “es un software de edición y procesamiento de nube de puntos 3D (y malla triangular)” (Girardeau-Montaut, 2017). Este programa, es de particular uso en geomorfología porque proporciona un análisis topográfico 3D espacialmente variable, y los procesos fotogramétricos y de georreferenciación se obtienen en puntos. La precisión de coordenadas, así como la geometría de la red de imágenes, calidad, y cantidad, son función de las características del estudio, lo que puede llevar a errores de posición de puntos que son espacialmente variables, pero localmente, altamente correlacionables. Por tanto, con este

programa (versión 2.11. alpha), se van a alinear las ortofotos donde los puntos de enlace serán algunos de los bloques desprendidos, y una vez alineadas con precisión, se crearán los Modelos de Elevación Digital (DEMs).

Para obtener los archivos DEM, es necesario utilizar previamente el programa CloudCompare, para realizar las alineaciones de cada una de las ortofotos obtenidas por el dron. Cada ortofoto en 3D, está constituida por un conjunto de nubes de puntos a partir de los cuales se va a trabajar. Para alinearlas con mayor precisión, se van a alinear por partes, es decir, por un lado, escarpes, por otro canales, y por otro depósitos. La alineación se va a realizar en función de la ortofoto considerada de mayor calidad, que es la ortofoto obtenida en junio de 2018. En esta ortofoto se va a considerar el archivo preferente con respecto al resto, por ello, se van a alinear tanto el área fuente, como el canal, como el depósito de esta manera:

- Ortofoto 2018 (archivo preferente) con ortofoto 2016.
- Ortofoto 2018 (archivo preferente) con ortofoto 2017.
- Ortofoto 2810 (archivo preferente) con ortofoto 2018NOV.

La alineación tiene un papel muy importante para poder trabajar de manera correcta y precisa a posteriori. Esta, consiste en tomar el archivo preferente junto con otro, e intentar ir marcando en el mismo punto, tanto del archivo preferente, como del que se quiere alinear. Así, se realizará sucesivamente mínimo unas 20 veces, para conseguir una alineación aceptable con la que posteriormente se podrá trabajar sin problemas. Una vez marcados los puntos de referencia, tanto en el archivo preferente, como en el que se quiere alinear se procede a realizar la alineación, donde nos saldrá una pantalla con la información de la alineación realizada, es decir, con el valor de RMS obtenido y el valor de la matriz. El valor de RMS, nos va a dar el valor de la precisión obtenida en la alineación con respecto al archivo preferente. Lo ideal es conseguir un RMS de 0, ya que sería una precisión perfecta, aunque conseguir este valor es prácticamente imposible. Si no se consigue alinear como se pretende, posteriormente se va a realizar una alineación automática, para conseguir un valor más acercado a 0, en la que el propio programa va a coger todas las nubes de puntos de los dos archivos y los va a alinear, consiguiendo una alineación más acertada.

Cabe destacar la presencia de errores adicionales, producidos por el denso emparejamiento entre el archivo preferente y el que se quiere alinear, y por la presencia de vegetación. Estos errores nos pueden presentar problemas de precisión interna que hay que intentar evitar. Para

ello, se va a intentar recortar, y eliminar las nubes de puntos correspondientes a las zonas de vegetación, para obtener datos con mejor precisión.

También algunas de las alineaciones realizadas pueden presentar error de precisión de altura en la posición horizontal, o en la posición vertical.

Además, de alinear las nubes de puntos 3D, las cuales conforman el barranco, se va a calcular la distancia entre dos nubes de puntos (Figura. 20.) con el fin de obtener unos datos de erosión y depósito, correlacionables con los datos de erosión y depósito obtenidos en Qgis.

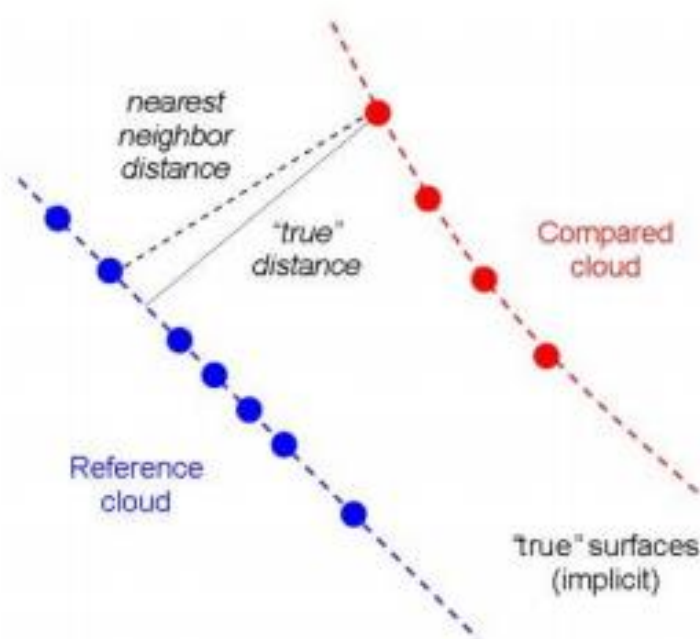


Figura. 20. Representación gráfica de cómo calcular la distancia entre dos nubes de puntos. (Girardeau-Montaut, 2017).

Por lo tanto, el objetivo de utilizar este programa será alinear, analizar y comparar las nubes de puntos obtenidas de un año respecto al otro, para obtener los DEMs, y hacer un análisis de precisión en erosión y depósito.

4.4.1. Ortofotos

Para comenzar, se cargan las ortofotos de los años 2016, 2017, 2018JUN, y 2018 NOV en el programa Qgis. Una vez introducidas las ortofotos, es necesario comprobar que todas las capas que se vayan a crear a posteriori, tengan la georreferenciación correspondiente a ETRS89/UTM zone 31N con un ID de la autoridad EPSG: 25831.

Hay que resaltar la calidad que se obtiene de las ortofotos con el vuelo de dron. En estas ortofotos se observan perfectamente los bloques presentes en el barranco. Por tanto, si se

recopilan varias ortofotos de la misma calidad obtenidas a partir del vuelo, se puede hacer un estudio evolutivo más exhaustivo del mismo (Figura. 21.).

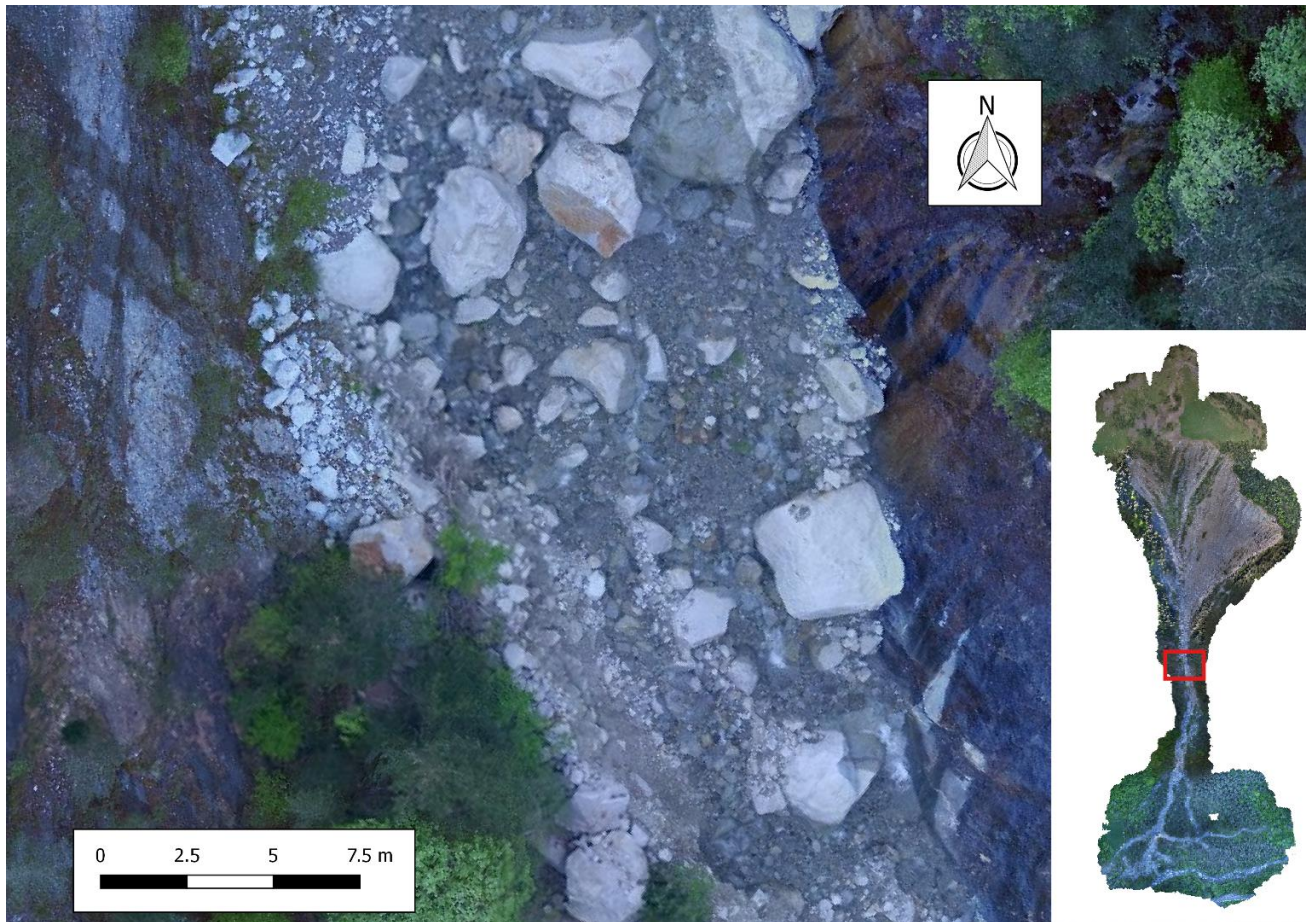


Figura. 21. Ortofoto correspondiente a 2017 en la que se puede observar la buena resolución obtenida. El recuadro rojo de la imagen inferior muestra el aumento de una zona específica del canal en la que, debido al vuelo realizado con el dron, se observan con precisión los bloques presentes en el mismo.

4.4.1.1. Cartografía

Para evaluar con precisión el barranco, se debe iniciar el estudio creando una cartografía en detalle del área de interés para presentar la información fundamental y el objetivo particular de la misma (Figura. 22.), con el fin de recoger datos e interpretar la información deseada de manera fiable.

2017

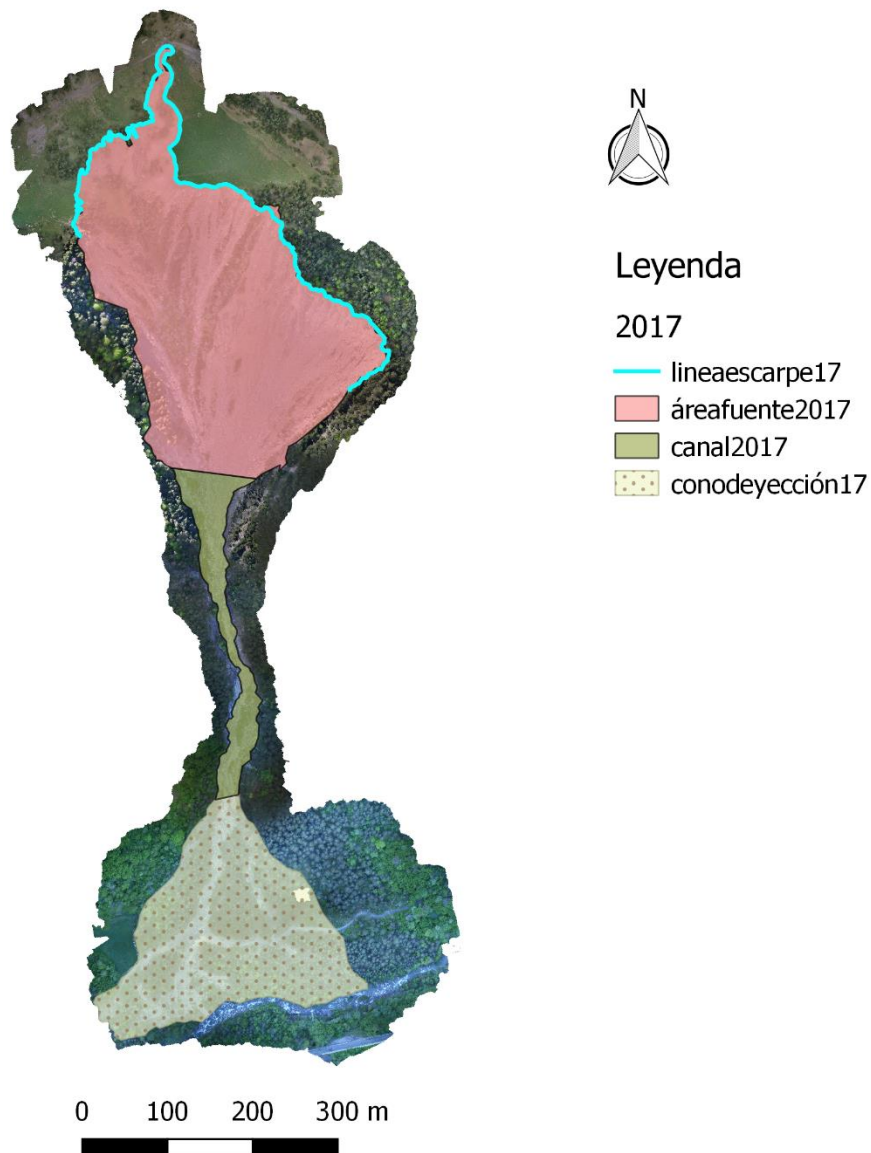


Figura. 22. Ejemplo de cómo se van a realizar las cartografías en detalle de las 4 ortofotos disponibles. Cartografía correspondiente a la ortofoto de 2017.

La división del barranco será cartografiada con archivos de polígonos, los bloques con archivos de puntos, y el escarpe con archivo de línea.

4.4.1.2. Bloques

Después de la cartografía, se va a trabajar con los bloques de rocas presentes en el barranco, también cartografiados en el apartado 5.1. Foto-interpretación. Bloques. Por ello, se crean archivos shape correspondientes a puntos para cada año en la que se van a marcar los bloques de roca significativos. En este caso, los puntos se van a dividir en bloques de roca presentes en

un año, y no en otro, y viceversa. Una vez localizados los puntos, se ha tenido en cuenta la longitud de los mismos con el fin de clasificarlos por grupos. Esta clasificación se ha dividido en 3 clases:

- Bloques grandes, ≥ 2 metros
- Bloques medianos, >1 metro y < 2 metros
- Bloques pequeños, ≤ 1 metro

Con el fin de hacer una comparativa por cada año de la cantidad de bloques desprendidos, áreas, y volúmenes de los bloques más grandes, se van a realizar histogramas y distribuciones fractales en el Excel para analizar las distintas situaciones, y comportamientos del barranco de un año a otro gráficamente.

Para hacer más detallado el estudio se han seleccionado los bloques más grandes desprendidos en cada ortofoto como los más representativos. Una vez seleccionados, se procede a calcular el volumen de estos bloques ya que son los menos abundantes, aunque si los más representativos en la zona del área fuente. Para no complicar el análisis, se ha considerado la fórmula de la esfera para estimar el volumen de los bloques medidos. Suponiendo una esfera metida en un cubo, se va a calcular la longitud de las aristas (L) del cubo (ecuación 1) y el radio de la esfera (R) será la mitad de esas aristas (Ecuación 2), llegando con ello a calcular por geometría el volumen (V) de la esfera (Ecuación 3), obteniendo así el volumen aproximado de cada uno de los bloques elegidos, en este caso, los mayores a dos metros.

$$L = \sqrt{\text{Área de los bloques}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$R = \frac{L}{2} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 \quad (\text{Ecuación 3})$$

El resultado obtenido de estos bloques se desarrollará a lo largo del apartado 5. Resultados.

Finalmente, con los valores de precipitación aportados por el departamento de ingeniería del terreno, cartográfica, y geofísica, se van a recoger los valores tomando como referencia el transcurso de una ortofoto a otra. Con ellos, se va a calcular el sumatorio de los mismos, y se van a graficar, para posteriormente poder correlacionarlos con los volúmenes de bloques desprendidos.

4.4.2. DEM (modelo digital de elevaciones)

Un DEM (modelo de elevación digital), es “una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel del mar, que permite caracterizar las formas de relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo”. (INEGI, instituto nacional de estadística y geografía). Son archivos de tipo ráster con estructura regular, generados con tecnología LIDAR, obteniendo modelos de alta resolución y gran exactitud. En este caso se van a generar con el programa Cloudcompare.

Los archivos DEMs, producidos por técnicas de medición de alta resolución topográfica, están acelerando la comprensión de los procesos geomorfológicos. Cada vez, son más las fotografías digitales que se utilizan para generar dichos datos topográficos a partir de los vehículos aéreos no tripulados (UAV), un enfoque muy novedoso para permitir la obtención detallada, y cambios en una topografía compleja a partir de una fotografía (James et al., 2017).

Existen casos en los que los DEMs obtenidos presentan errores sistemáticos en la horizontal, vertical, o de manera oblicua (Figura. 23.). Esto, es debido a un error en la geometría de la red de imágenes (James et al., 2017), es decir, a un error de superficie donde los píxeles no coinciden entre DEMs. A continuación, se muestra un ejemplo, para poder entender mejor lo explicado y visualizarlo.

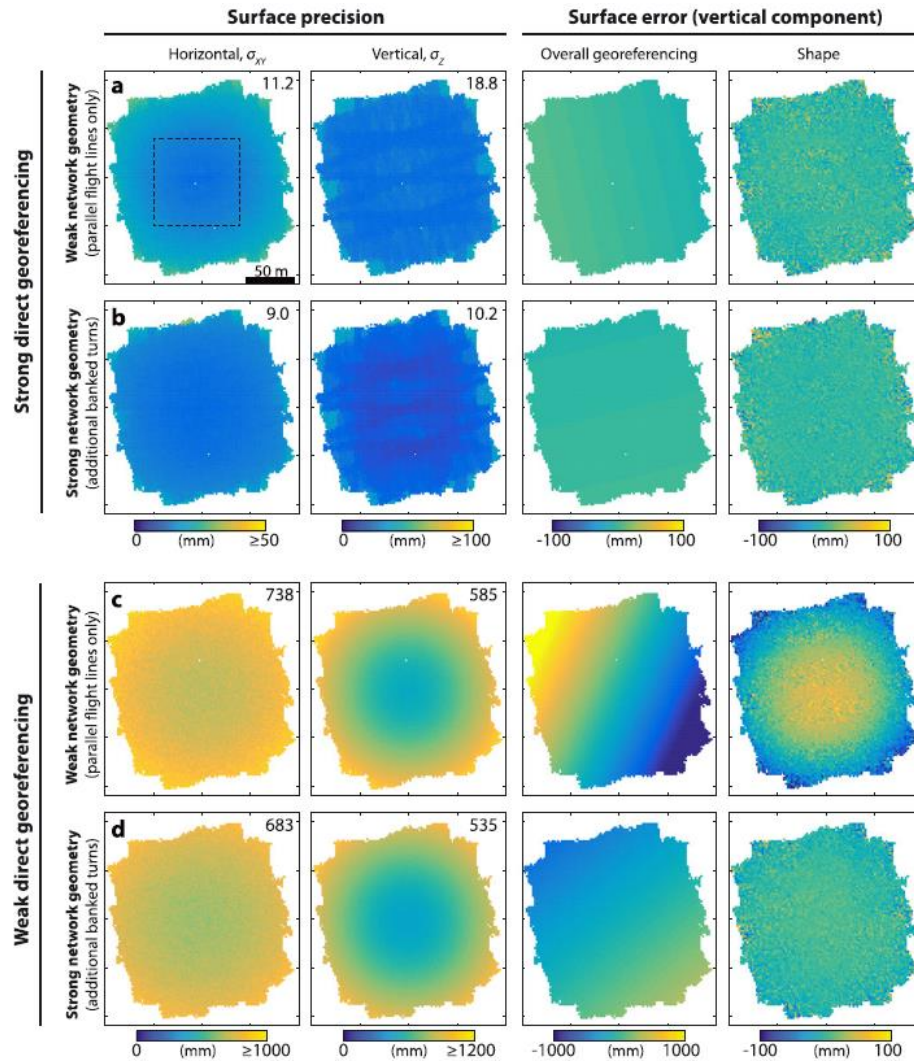


Figura. 23. Mapas de precisión y de errores verticales para levantamientos UAV simulados ya georreferenciados. Los cuatro escenarios que se presentan en este caso, se caracterizan por presentar una georreferenciación fuerte (a, b), o débil (c, d). Los valores insertados en la parte superior derecha de cada gráfico de precisión, proporcionan la precisión en el punto medio (en mm) dentro de la región abarcada por la línea discontinua en a) (James et al., 2017).

A continuación, se presenta uno de los archivos DEM obtenidos para cada una de las zonas, correspondiente al año 2017 (Figura. 24., Figura. 25., y Figura. 26.). Las plantillas de todos los DEMs juntos aparecen en el Anexo. 8. para una mejor visibilidad.

Estos DEMs, van a ser definitivos para posteriormente calcular la erosión-depósito con el transcurso de los años.

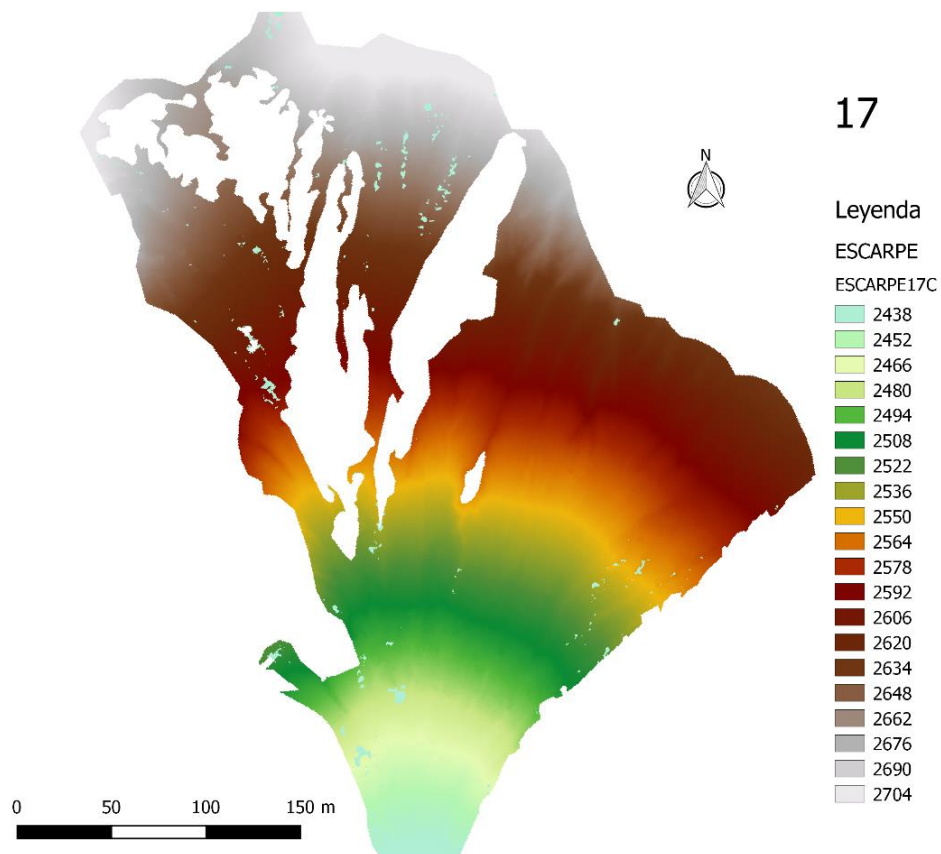


Figura. 24. Ejemplo de uno de los DEMs obtenidos del área fuente pertenecientes al año 2017 con su correspondiente leyenda y escala.

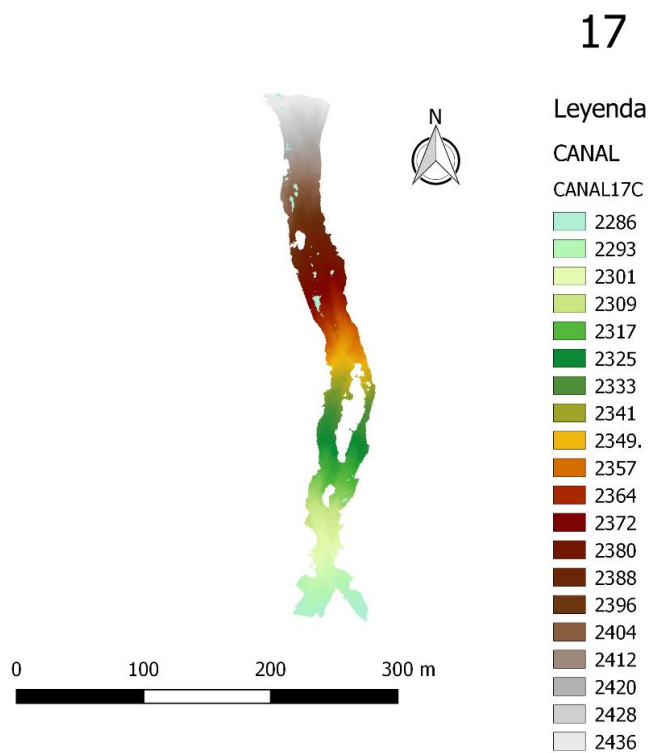


Figura. 25. Ejemplo de unos de los DEMs del canal pertenecientes al año 2017.

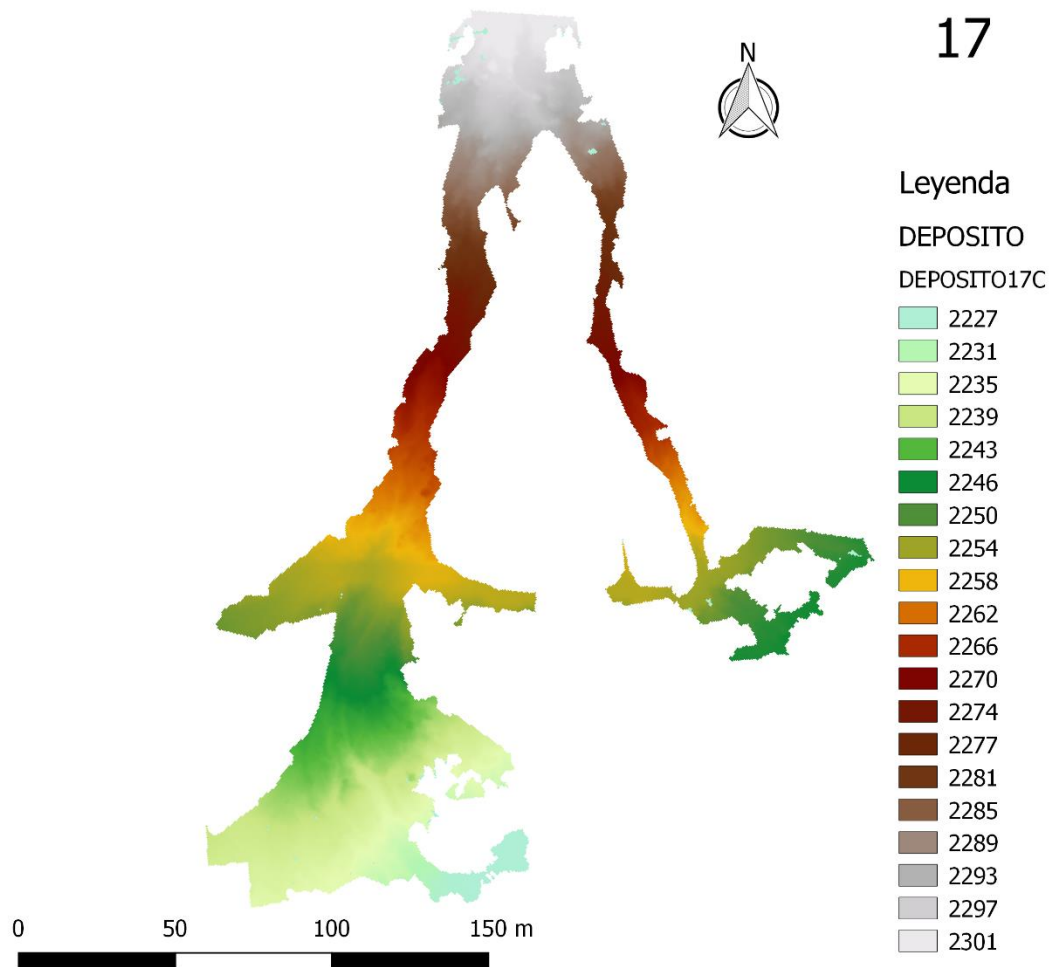


Figura. 26. Ejemplo de uno de los DEMs del cono de deyección pertenecientes al año 2017 con su correspondiente leyenda y escala.

Estos archivos se introducirán como capas en el programa Qgis, y se crearán las curvas de nivel correspondientes, la red hídrica (SAGA Gis), y los mapas de erosión-depósito con el transcurso de los años.

La presencia de agua tiene un papel fundamental del barranco, pues es uno de los mecanismos principales por los que se produce en mayor o menor medida desprendimientos de bloques. Por ello, se va a realizar la red hídrica (Figura. 27.) de todo el barranco a partir del programa SAGA GIS mediante los DEM (modelos de elevación digital).

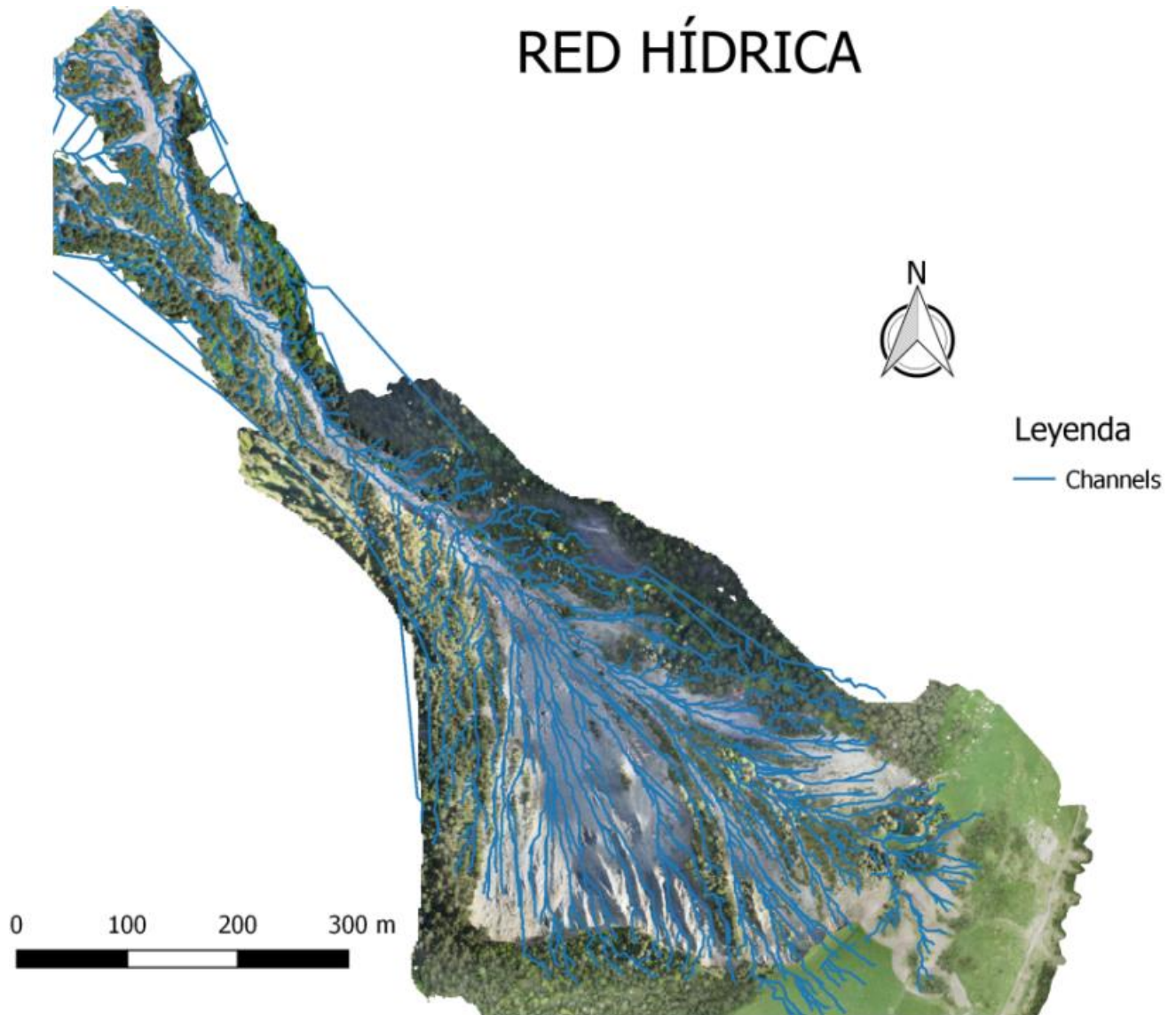


Figura. 27. Red Hídrica del área de estudio obtenida con el programa SAGA GIS.

Para evaluar en detalle el recorrido que tiene el flujo de manera preferente, se va a dibujar mediante un archivo shape correspondiente a líneas, el transcurso del flujo para cada año. La información del flujo preferente para cada año se desarrollará en el siguiente apartado (Apartado 5.1 Foto-interpretación).

A parte, se van a recoger los datos de pluviometría de los diferentes años estudiados (anejo.7), los cuales se graficarán, y se compararán con las distribuciones fractales y volúmenes, para concluir si el factor del agua es de gran importancia.

Para determinar la erosión y depósito en el barranco producida en los últimos años, se va a utilizar la calculadora ráster de Qgis, en la que se restarán los DEM (modelos de elevación digital) de los años 2016, 2017, 2018JUN, y 2018NOV, haciendo una comparativa con cada uno de ellos.

Realizar este análisis, va a suponer conocer mejor la actividad de la cuenca y determinar las zonas en las que se está desarrollando el desprendimiento de bloques, zonas de acumulación de material, y en conjunto las zonas más críticas en cuanto a acumulación de materiales.

5. RESULTADOS

El estudio de este trabajo de fin de master pretende visualizar y demostrar la evolución del barranco en los últimos cuatro años.

Por ello, se van a introducir las ortofotos del año 2016 al año 2018 en el programa Qgis para: crear la cartografía en detalle de cada mapa, observar los bloques presentes, si varían o no con el transcurso del tiempo, mostrar la red hídrica señalando la red de flujo preferente en cada año, y evaluar la erosión y depósito del barranco a partir de los modelos de elevación digital (DEM) de cada año, obtenidos a partir del programa CloudCompare.

Para destacar la importancia que supone la utilidad del dron para este tipo de análisis geomorfológicos, y hacer un análisis más preciso, el trabajo llevado a cabo, se realizará por partes para una mejor comprensión del trabajo, con el fin de analizar de manera foto interpretativa y analítica los resultados obtenidos.

A continuación, se detallarán cada uno de los procesos llevados a cabo del barranco Rebaixader. El apartado 5.1., se va a centrar prioritariamente en la cartografía, flujo preferente, y bloques; seguidamente, en el 5.2., se explicará cómo se ha realizado la alineación de las nubes de puntos para cada una de las partes del barranco y sus respectivos años. A partir de estas alineaciones se obtendrán los modelos de elevación digital (DEMs), los cuales se desarrollarán en el apartado 5.3. para finalmente obtener los valores de erosión- depósito.

5.1. Foto- Interpretación.

En este apartado, el programa por excelencia que se va a utilizar va a ser el programa Qgis 2.14., en el que se van a ejecutar para cada año, los siguientes puntos que vienen a continuación:

Cartografía

Para poder realizar la cartografía, se van a cargar las ortofotos obtenidas por el dron en el programa Qgis, y se van a crear capas shape correspondientes a polígonos líneas y puntos. Con estas capas, se van a dibujar las tres zonas del área de estudio y la línea de escarpe de manera independiente para cada año (Figura. 28., y anejo.1.). También se crearán capas shape correspondientes a puntos, los cuales representarán los bloques, aunque el tema de bloques se desarrollará individualmente más adelante en otro apartado.

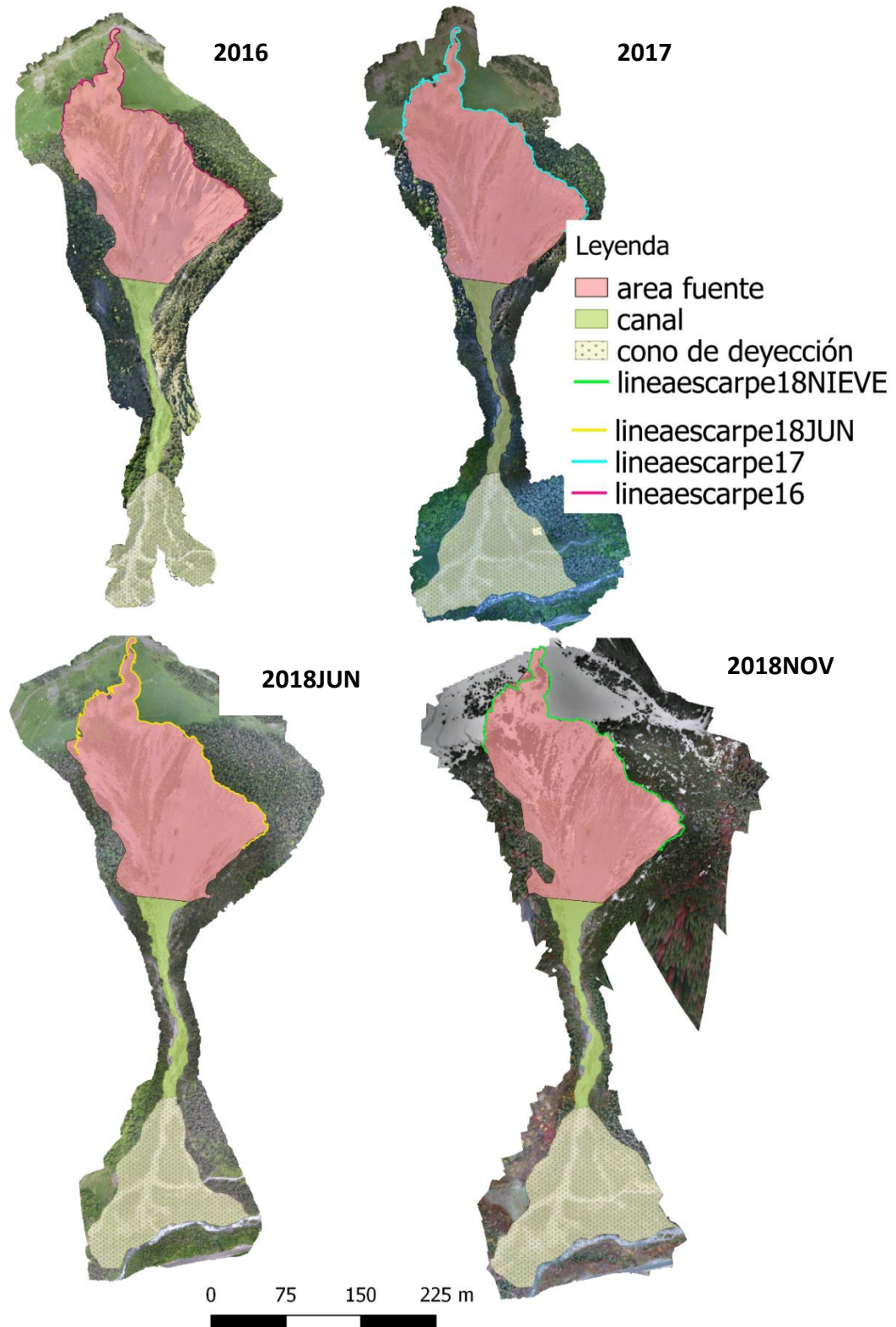


Figura. 28. Cartografía en detalle del barranco Rebaixader perteneciente al año 2016 (zona superior izquierda), 2017 (zona superior derecha), 2018JUN (zona inferior izquierda), y 2018NOV (zona inferior derecha) donde quedan representadas las distintas partes del barranco: área fuente, canal, cono de deyección, y línea de escarpe.

Hacer una interpretación visual de la zona mediante la cartografía es importante. Esta cartografía, se lleva a cabo con el fin de observar la evolución del barranco con el transcurso de los años, y hacer una comparación general del mismo (Figura.28.). En rasgos generales, no se observan cambios en la morfología del barranco, aunque el análisis cartográfico se va a centrar prioritariamente en la línea de escarpe de cada año, ya que es una zona crítica y expuesta vulnerablemente a erosión, y donde se van a visualizar mejor los cambios producidos (Figura.29., y Anejo. 1. para una mejor visibilidad).

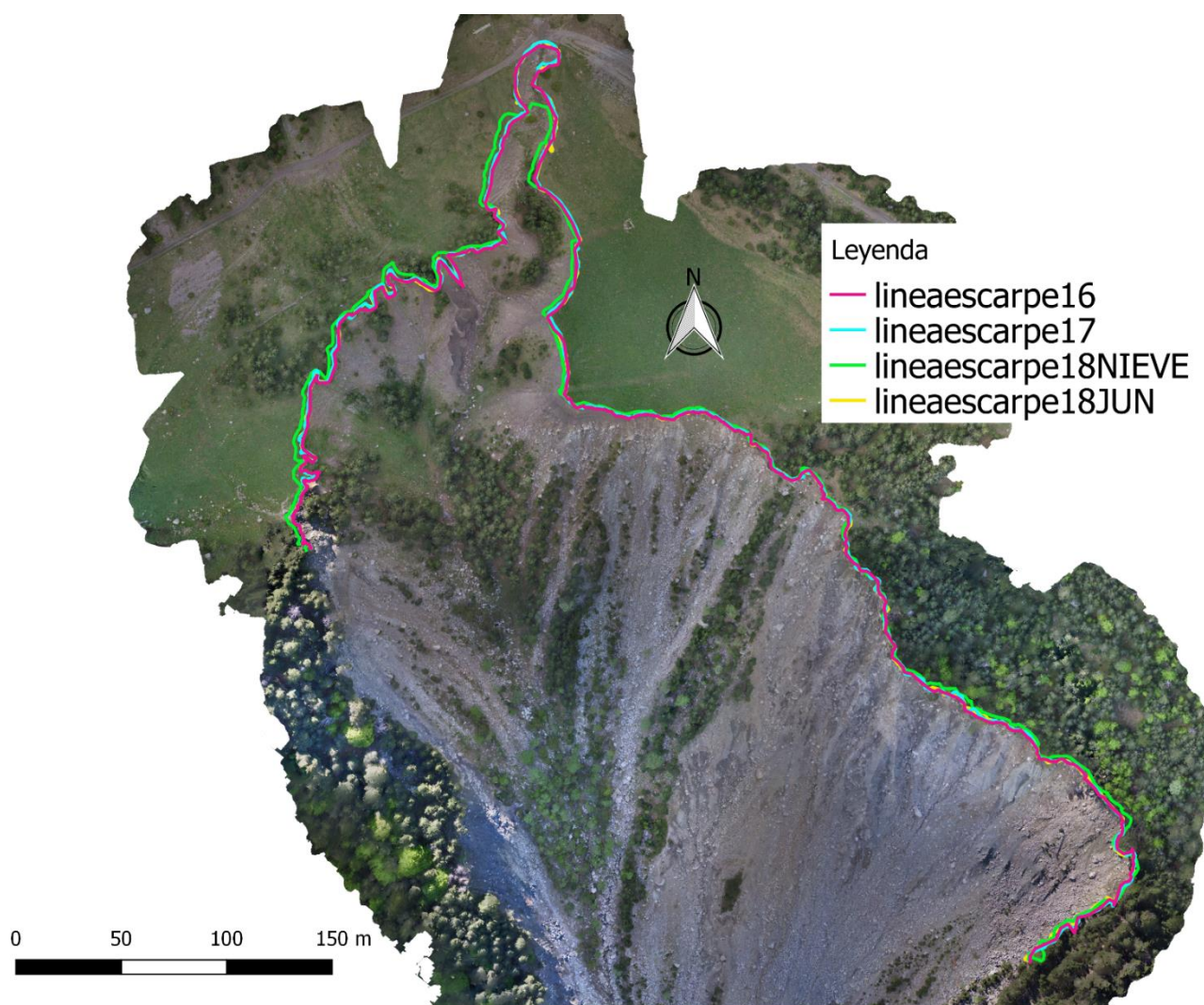


Figura. 29. Ortofoto de la zona de estudio en la que se presentan las líneas de escarpe de 2016 (rosa), 2017 (azul), 2018JUN (amarillo), y 2018NOV (verde) con la que se hace una comparativa de las mismas para observar la existencia de erosión en el límite del escarpe con el transcurso del tiempo.

Si comparamos por años las líneas de escarpe, se pueden observar pequeñas diferencias milimétricas, prácticamente invariantes. Para observar mejor el cambio, se va a comparar la línea de escarpe de 2016 con la línea de escarpe de junio de 2018, en la que se observa que la línea de escarpe verde, correspondiente a la línea de escarpe de noviembre de 2018, se sitúa

detrás de la línea de escarpe rosa, correspondiente a la de 2016. De esta manera, se confirma foto-interpretativamente, la existencia de erosión con el transcurso del tiempo.

Red hídrica y contorno de flujo preferente

Para evaluar en detalle el recorrido que tiene el flujo de manera preferente, se va a dibujar mediante un archivo shape correspondiente a líneas, el transcurso del flujo para cada año, (Figura. 30., y Figura. 31.). En el anejo 1. se pueden ver las siguientes imágenes en mayor tamaño.

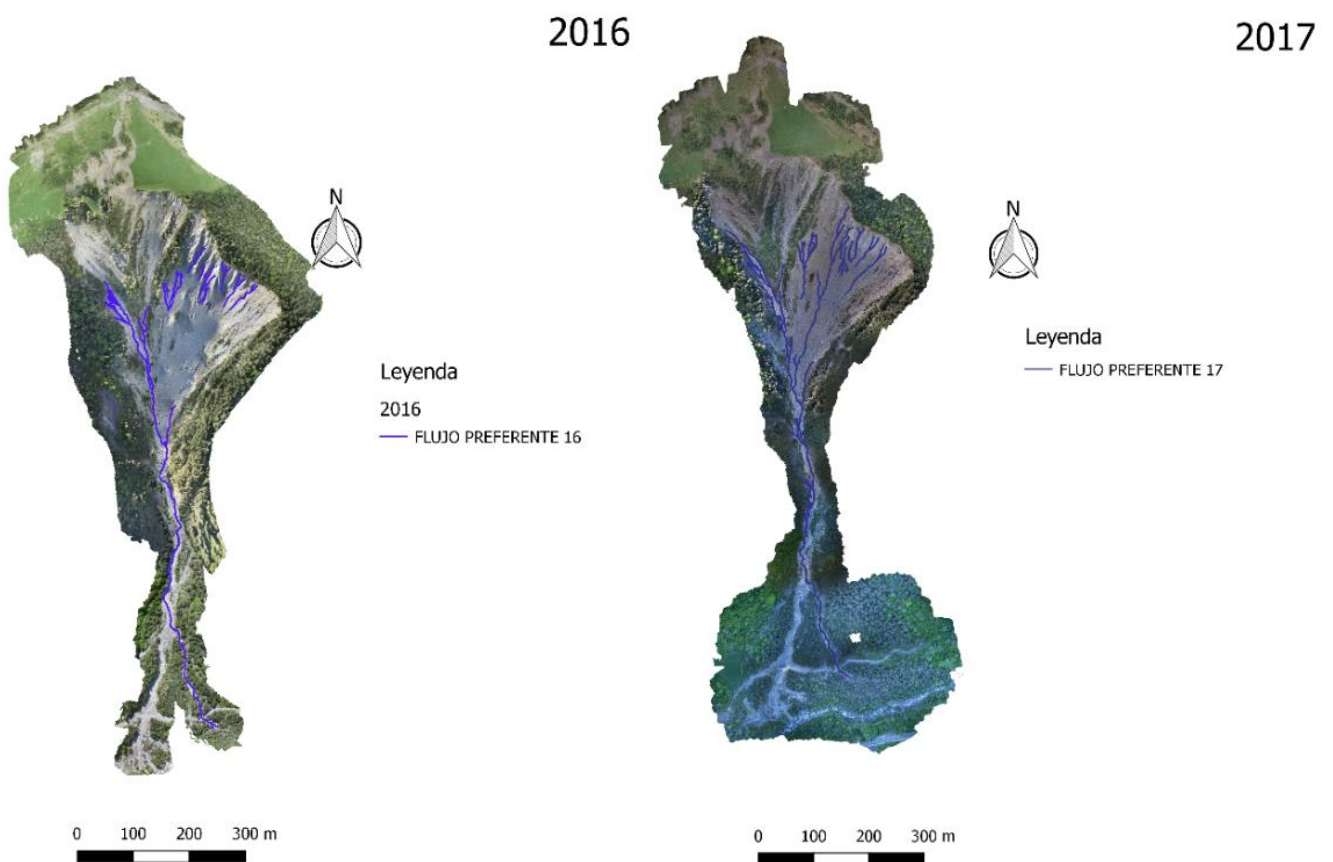


Figura. 30. Líneas de flujo preferente de los años 2016 y 2017.

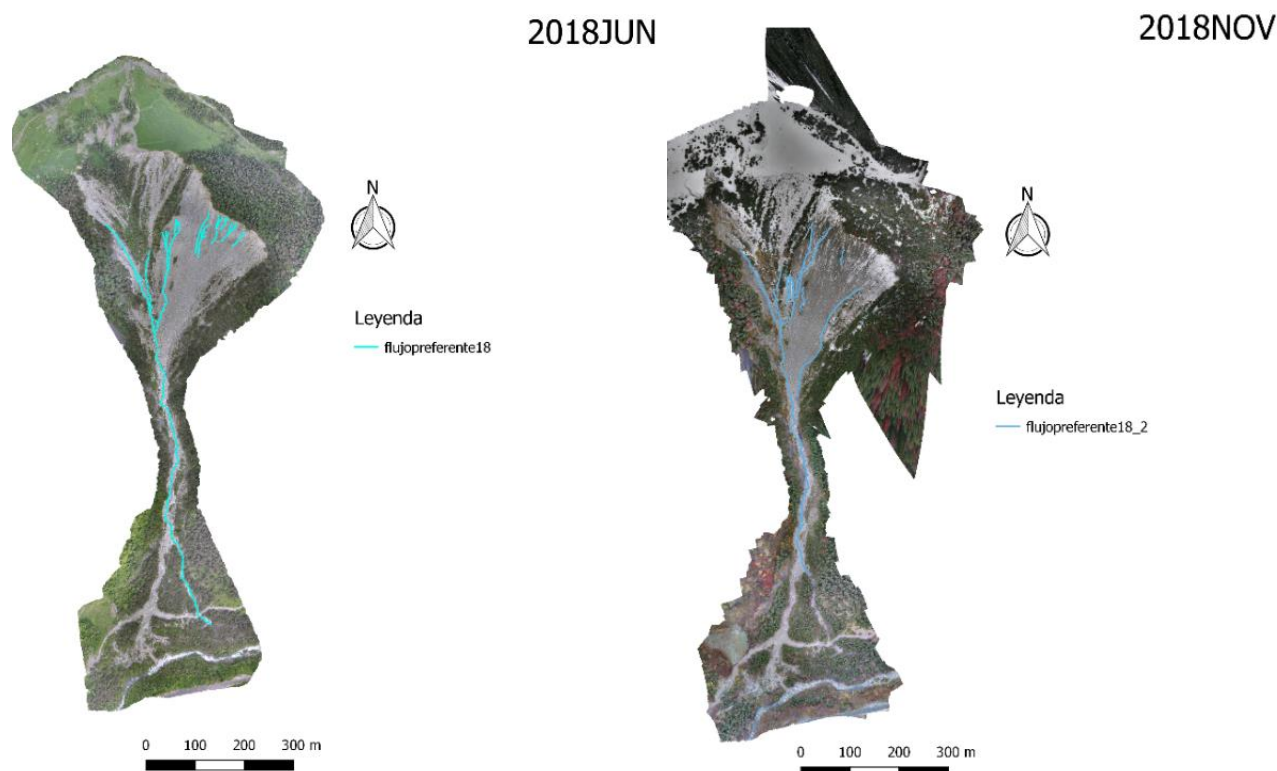


Figura. 31. Líneas de flujo preferente de los años 2018JUN, y 2018NOV.

De manera general, el flujo preferente sigue el mismo transcurso en las 4 ortofotos, aunque en la ortofoto del año 2017, se puede observar cómo en la zona central del área fuente aparece un nuevo arroyo que llega a comunicar con el canal principal, el cual se inicia en la margen izquierda del área fuente. Cabe destacar, el aumento de flujo a partir del año 2017, llegando a ser más abundante en este año, y en el año 2018NOV, donde aparece un nuevo canal en la margen derecha del área fuente.

El aumento de flujo en la zona de estudio, podría deberse a recientes precipitaciones, o una gran abundancia de precipitaciones torrenciales ocurridas en el transcurso de la ortofoto del año 2016 al año 2017. También, en el caso de la ortofoto de 2018NOV, podría ser debido al deshielo, aunque este tema se tratará más adelante.

A continuación, en la Figura. 32. se han unido las líneas de flujo en la ortofoto de 2018 para observar mejor las diferencias del flujo preferente de los diferentes años en conjunto.

2016-2017-2018JUN-2018NOV

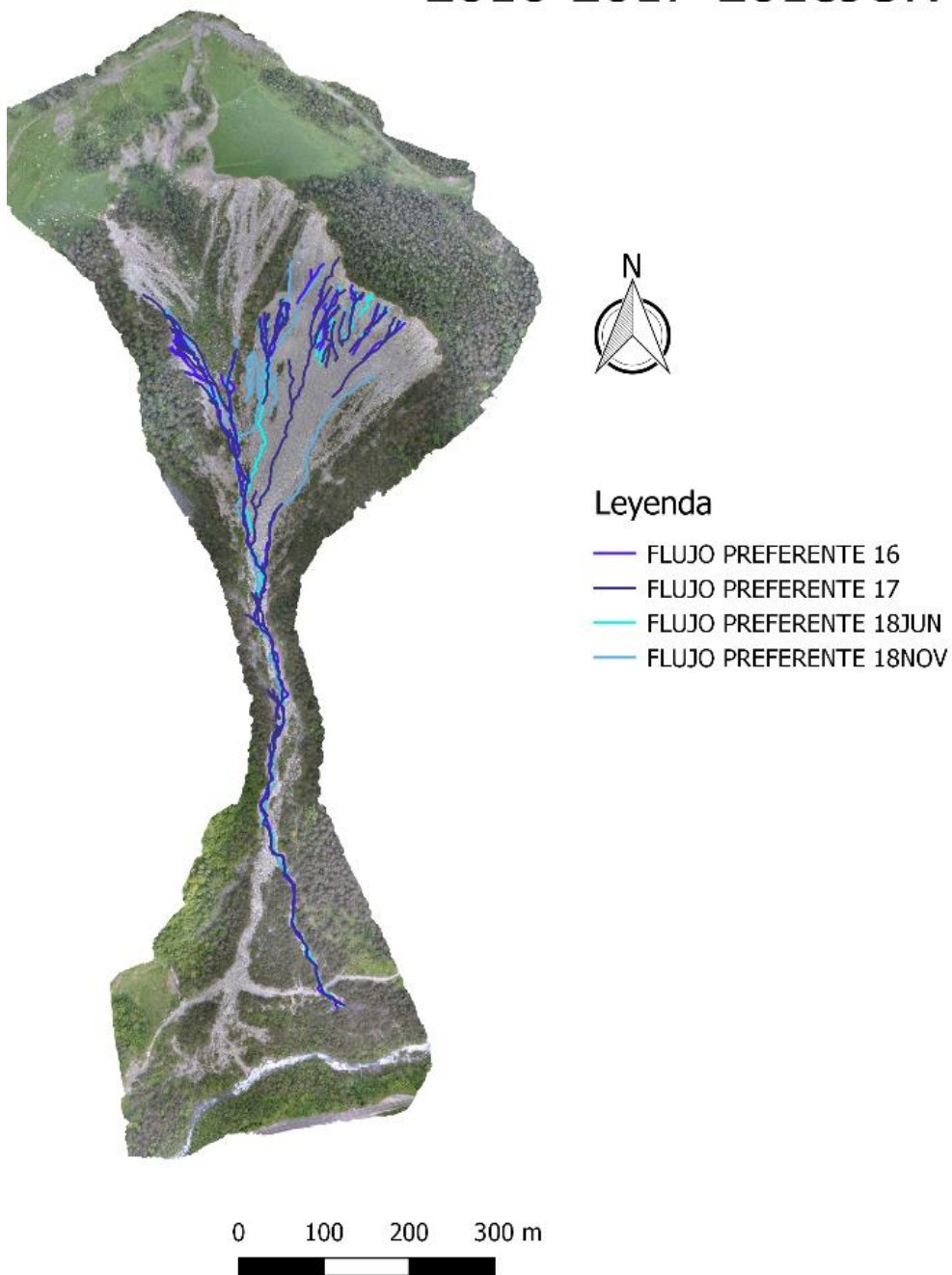


Figura. 32. Líneas de flujo preferente obtenidas de las 4 ortofotos, representadas en la ortofoto del año 2018.

Bloques

En la siguiente Figura (Figura. 33), se presentan cartografiados el número total de bloques observados en cada año. Posteriormente, se realizará un recuento final de bloques en función de su disposición de un año con respecto a otro. En conjunto, estas imágenes se pueden observar en mayor tamaño en el anejo. 1.

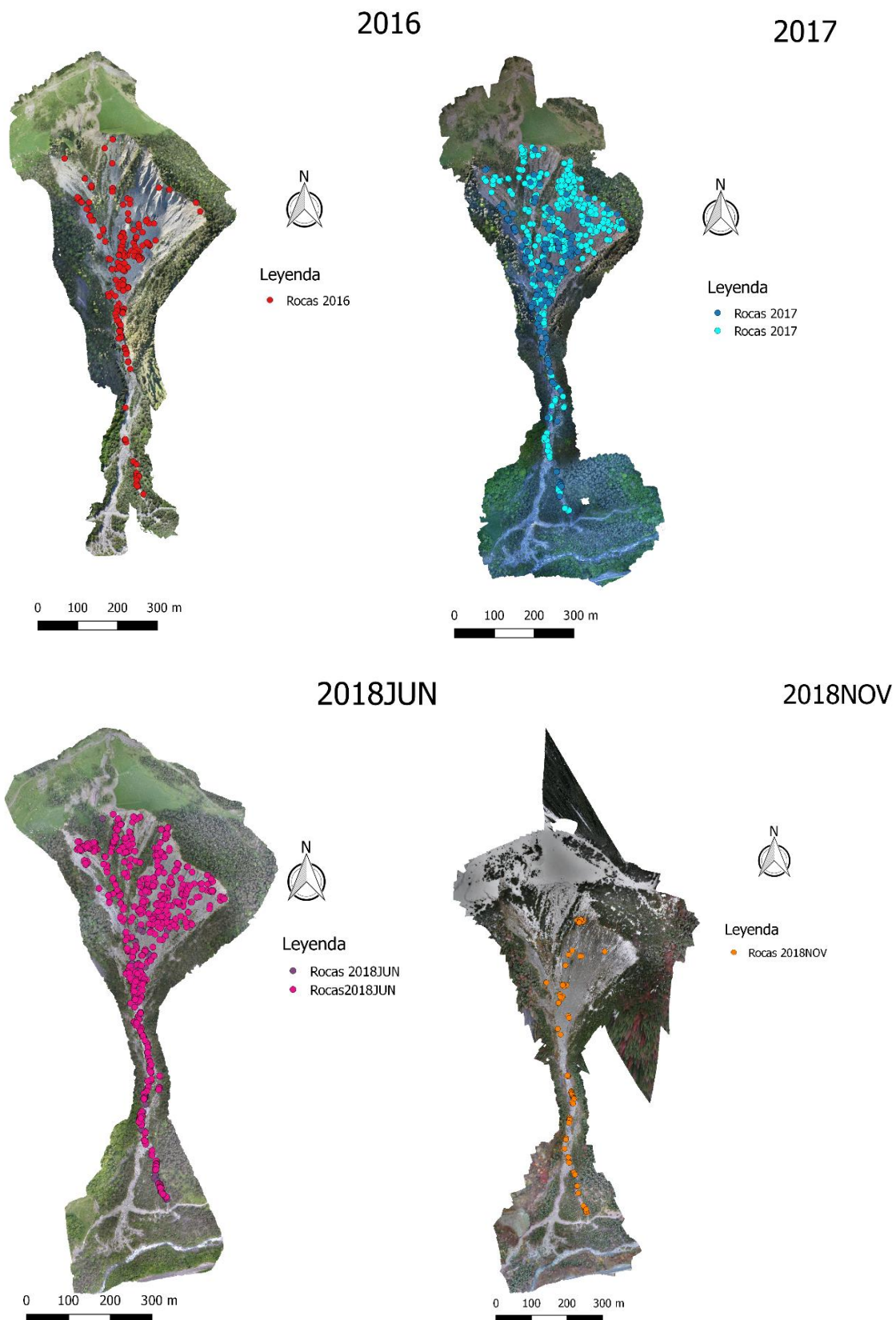


Figura. 33. Cartografía de los bloques presentes en los años 2016,2017,2018JUN, y 2018NOV.

Con respecto al número de bloques observados en los diferentes años se han marcado; en la ortofoto de 2016 un total de 242 bloques, en la ortofoto de 2017 un total de 772 bloques, en la

ortofoto de 2018JUN un total de 863 bloques, y en la ortofoto correspondiente a 2018NOV un total de 119 bloques. Además, se puede observar cual es el canal activo del barranco gracias a la presencia de bloques marcados.

En función de la disposición de bloques de un año con respecto a otro, se van a dividir en rocas presentes en un año y no en otro, y viceversa. Esto se va a ejecutar otorgando un color para cada ortofoto. La división se realizará en cada una de las ortofotos correspondiente a intervalos de tiempo de un año o meses y será la siguiente (Figura.34., y Figura.35.):

- Rocas presentes en 2016 y no en 2017
- Rocas presentes en 2017 y no en 2018Jun.
- Rocas presentes en 2018Jun y no en 2018NOV.

Debido a la abundancia de puntos en el barranco se ha ampliado una zona pequeña en los mapas obtenidos para que se visualicen algunos de los bloques marcados presentes (Figura. 34., y Figura. 35.)

2016-2017

2017-2018JUN

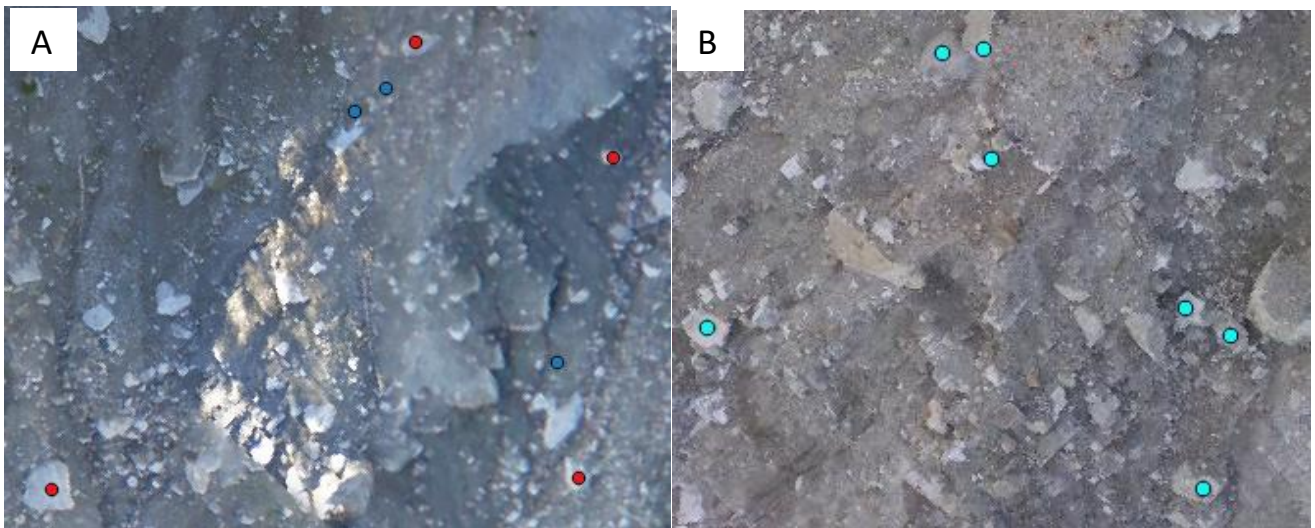
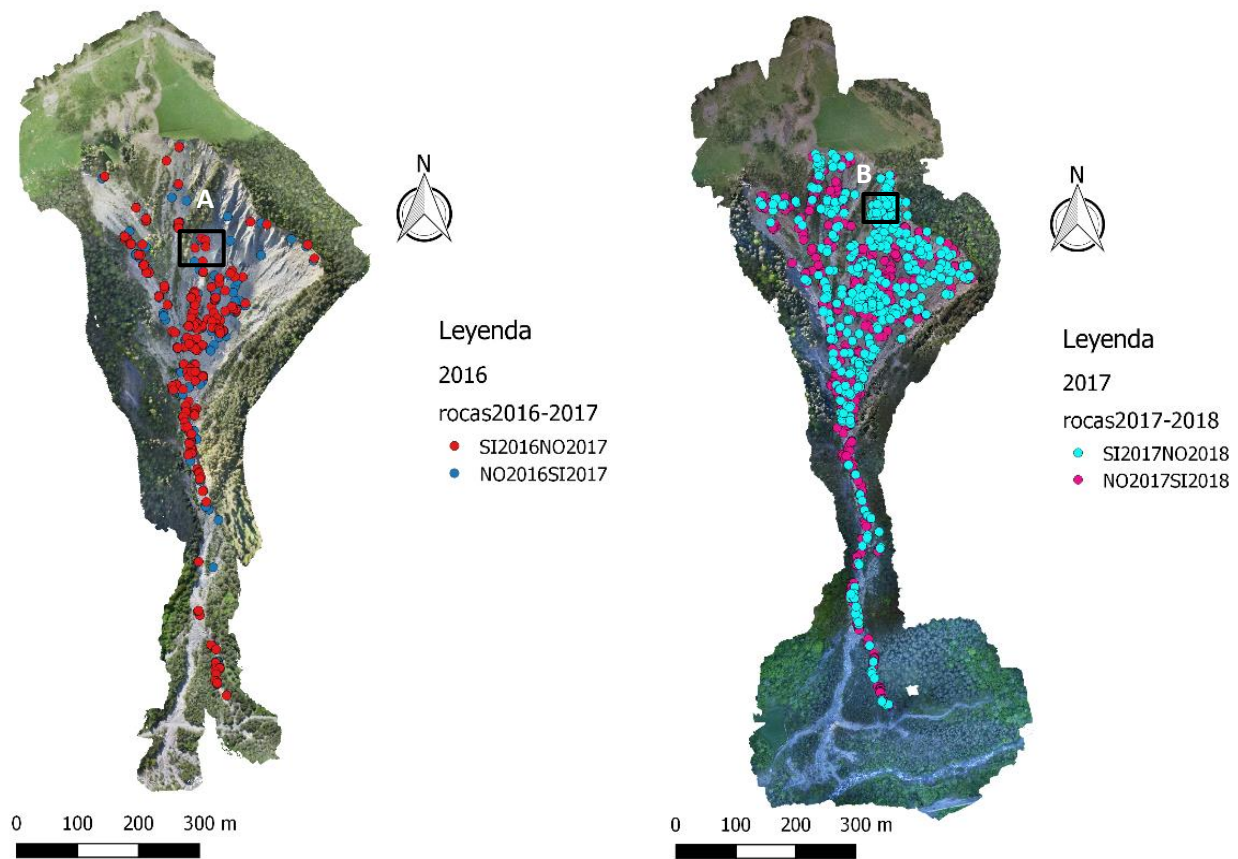


Figura. 34. Mapa final de comparativa de bloques de los años, 2016-2017, y 2017-2018JUN, donde se representan los bloques presentes en un año y no en otro y viceversa. Además, se ha ampliado una zona diferente en cada ortofoto para la visualización de algunos de los bloques marcados, donde en la imagen A, se presentan los bloques presentes en 2016 y no en 2017, y en la imagen B, se presentan los bloques presentes en 2017 y no en 2018JUN.

2018JUN-2018NOV

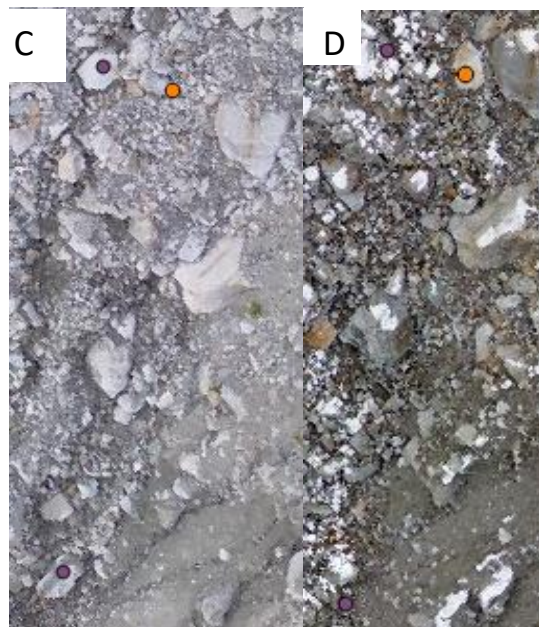
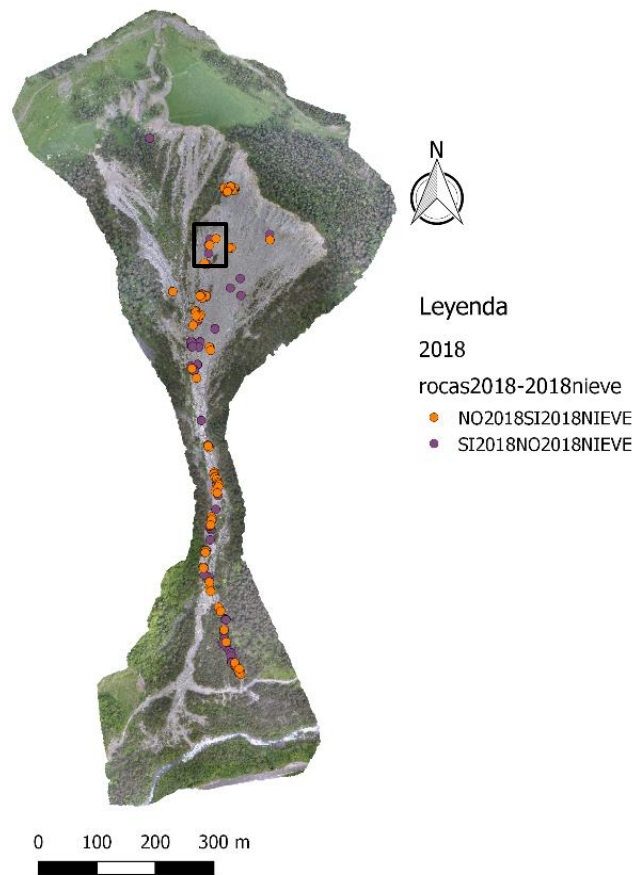


Figura. 35. Mapa final de comparativa de bloques de los años 2018JUN-2018NOV, donde se representan los bloques presentes en un año y no en otro y viceversa. Además, se ha ampliado la misma zona para la visualización de algunos de los bloques marcados, donde en la imagen C, se presentan los bloques presentes en 2018JUN y no en 2017, y en la imagen D, se presentan los bloques presentes en 2018NOV y no en 2018JUN.

Buscar la trayectoria seguida de algunos de los bloques es importante, ya que nos permite observar y medir la distancia recorrida con el transcurso de los años. A continuación, se muestran algunas de las rocas visibles que han tenido una trayectoria con el transcurso del tiempo, es decir, de 2016 a noviembre de 2018 (Figura.35., Figura.36., y Figura.37.). A continuación, se muestran algunas de las ortofotos en las que se observa la trayectoria seguida de algunos bloques del transcurso de un año a otro.

Esta ortofoto corresponde al 2017 (Figura.35.), donde el punto rojo va a representar donde se encontraba el bloque en 2016, y en azul donde se va a encontrar en el año 2017. Además, se ha medido la distancia recorrida, obteniendo un valor de aproximadamente 6,5 metros recorridos en el transcurso de un año con respecto a otro.



Figura. 36. Imagen perteneciente a las ortofotos de 2016 y 2017, donde se representa una de las trayectorias seguidas de las rocas con el transcurso del tiempo, y la distancia que ha recorrido aproximadamente.

Esta ortofoto corresponde a junio de 2018 (Figura. 36.), donde el punto azul va a representar donde se encontraba el bloque en 2017, y en rosa donde se va a encontrar en junio de 2018. Además, se ha medido la distancia recorrida, obteniendo un valor de aproximadamente 1.8 metros recorridos en el transcurso de un año con respecto a otro.



Figura. 37. Imagen perteneciente a las ortofotos de 2017 y junio de 2018, donde se representa una de las trayectorias seguidas de las rocas con el transcurso del tiempo, y la distancia que ha recorrido aproximadamente.

Esta ortofoto corresponde a junio de 2018 (Figura. 37), donde el punto rojo va a representar donde se encontraba el bloque en 2016, y en morado donde se va a encontrar en junio de 2018. Además, se ha medido la distancia recorrida, obteniendo un valor de aproximadamente 5 metros recorridos en el transcurso de 3 años.

Se ha intentado seguir la trayectoria de los bloques con el objetivo de observar la distancia recorrida con el transcurso del tiempo. Esto, ha sido inviable, ya que muchos de esos bloques

han sido tapados por otros depósitos, o simplemente en la caída se han ido fragmentando, impidiendo así observar la trayectoria seguida.



Figura. 38. Imagen perteneciente a las ortofotos de 2016 y de junio de 2018, donde se representa una de las trayectorias seguidas de las rocas con el transcurso del tiempo, y la distancia que ha recorrido aproximadamente.

Cada uno de los puntos que se ven representados en la Figura. 38., corresponden a bloques de rocas que se tienen en cuenta en este proyecto, y que se van a reflejar posteriormente en un archivo Excel. En el archivo Excel, se van a ordenar los bloques en diferentes tamaños, y en zonas (área fuente, canal y cono de deyección). Para ello, se ha tomado la longitud aproximada de cada uno de los bloques (tablas en el anejo.2). Cabe destacar, que es una medida aproximada ya que puede existir algún error en los datos por la diferencia de calidad en el píxel de los mapas.

Al ordenar la información en Excel se va a disponer de una tabla final del número de bloques por zona dependiendo del año estudiado (Tabla 2.). Las tablas y gráficas se presentan con una mejor visibilidad en el anejo.3.

Tabla 2. Número total de bloques de rocas de diferentes tamaños presentes en el barranco.

	Nº ROCAS											
	Bloques grandes, ≥ 2 metros				Bloques medianos, > 1 metro y < 2 metros				Bloques pequeños ≤ 1 metro			
	2016	2017	2018JUN	2018NOV	2016	2017	2018JUN	2018NOV	2016	2017	2018JUN	2018NOV
Área fuente	11	11	18	2	65	63	55	20	62	78	19	10
Canal	5	0	10	0	33	8	54	1	43	22	27	24
Cono deyección	0	0	0	0	1	3	2	16	21	11	43	44

Estos datos, posteriormente son representados en un histograma de frecuencias con el fin de evaluar la evolución de bloques desprendidos en las 3 partes del barranco desde la ortofoto de 2016, hasta la ortofoto de 2018NOV (Figura. 39., Figura. 40., y Figura. 41.).

En los histogramas mostrados en las siguientes figuras, se pueden observar notables diferencias de un año respecto a otro, los cuales se van a analizar en detalle.

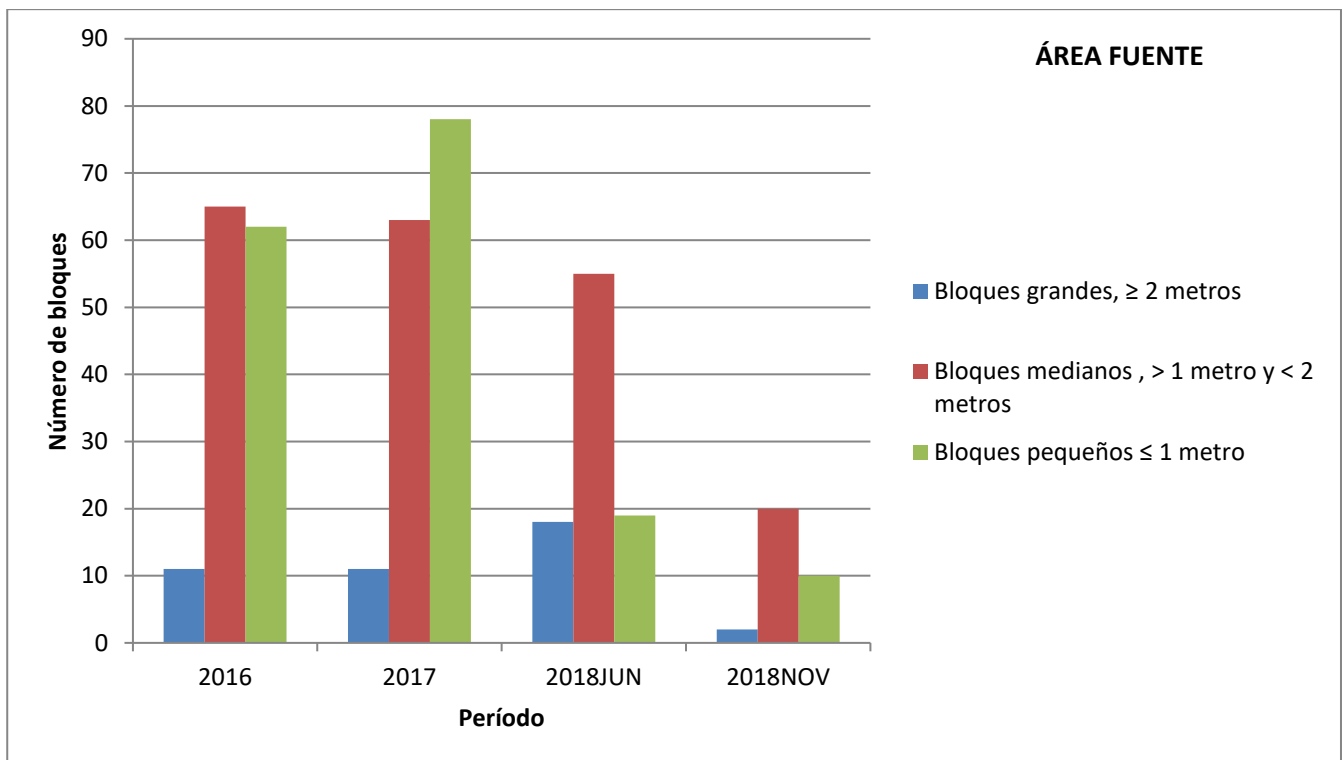


Figura. 39. Histogramas del número total de rocas en la zona del área fuente del barranco Rebaixader. Se puede observar que la barra de cada color representa diferente tamaño de bloques, siendo: Bloques grandes ≥ 2 metros de color azul, Bloques medianos, > 1 metro y < 2 metros de color rojo, y bloques pequeños ≤ 1 metro de color verde.

De manera general, en el área fuente hay un incremento en el número de bloques desprendidos de la ortofoto de 2016 al 2017, y una disminución de la ortofoto de 2017 a 2018NOV (Figura. 39.). De manera detallada, el número de bloques grandes se mantiene invariable de la ortofoto de 2016 a 2017, en 2018JUN aumenta, y en 2018NOV vuelve a descender. Con respecto a los

bloques medianos desprendidos, de la ortofoto 2016 a 2018JUN se presenta un histograma prácticamente invariable, aunque se puede observar como en la ortofoto de 2018nov el número de bloques disminuye de manera considerable. Sin embargo, el número de bloques pequeños presenta un aumento de la ortofoto 2016 a 2017, y un descenso drástico de 2017 a 2018NOV.

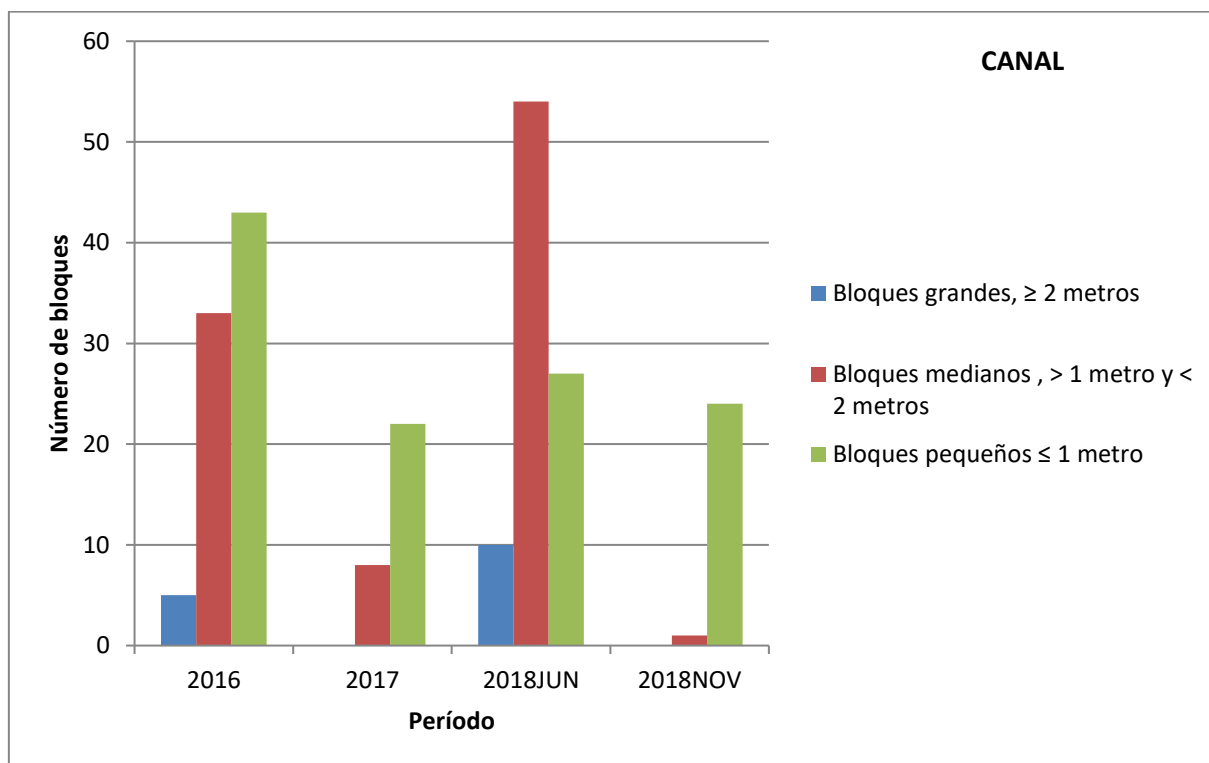


Figura. 40. Histogramas del número total de rocas en la zona del canal del barranco Rebaixader. Se puede observar que la barra de cada color representa diferente tamaño de bloques, siendo: bloques grandes ≥ 2 metros de color azul, bloques medianos, > 1 metro y < 2 metros de color rojo, y bloques pequeños ≤ 1 metro de color verde.

En el canal (Figura. 40.), de manera generalizada se refleja una disminución considerable en el número de bloques desprendidos de la ortofoto 2016 a 2018NOV. Cabe destacar una ausencia de bloques grandes desprendidos en la ortofoto de 2017 y de 2018NOV quedando únicamente bloques de tamaño mediano y pequeño. El número de bloques medianos presentes en el canal es destacable en la ortofoto de 2016, y, sobre todo, en la de 2018JUN, mientras que en 2017 y 2018NOV es minoritario. Sin embargo, en los bloques pequeños se presenta una disminución generalizada con el transcurso de los años.

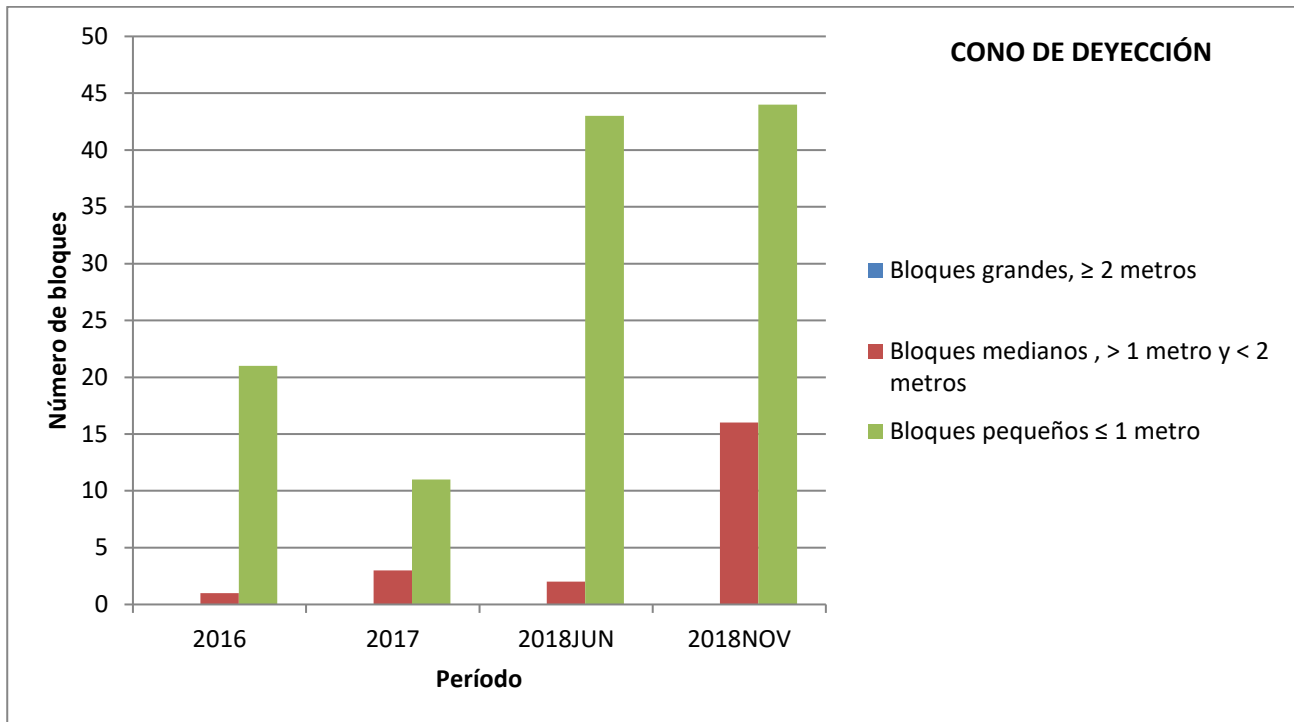


Figura. 41. Histogramas del número total de rocas en la zona del cono de deyección del barranco Rebaixader. Se puede observar que la barra de cada color representa diferente tamaño de bloques, siendo: Bloques grandes ≥ 2 metros de color azul, Bloques medianos, > 1 metro y < 2 metros de color rojo, y bloques pequeños ≤ 1 metro de color verde.

Mientras, de manera general en el cono de deyección (Figura. 41.), la presencia de bloques grandes es inexistente en los cuatro casos. Sin embargo, hay un aumento de bloques, tanto medianos como pequeños desprendidos del año 2016 al 2018NOV. Cabe destacar, el aumento tan drástico de bloques pequeños del año 2018NOV con respecto al año 2016.

La disminución general del número de bloques desprendidos puede ser debido a diversas causas como la fracturación de los mismos, enterramiento o arrastre a una distancia considerable impidiendo seguir la trayectoria del bloque. En este caso, posiblemente sea debido a enterramiento de estos bloques por el aumento de un año a otro de depósitos finos.

Para aprovechar las medidas longitudinales de cada bloque analizado, se han realizado gráficos de dispersión para cada año con el fin de observar y analizar la recta de regresión lineal que siguen y cuál es su significado (Figura. 42.). Todas estas gráficas se podrán ver con sus correspondientes tablas en el anejo.4.

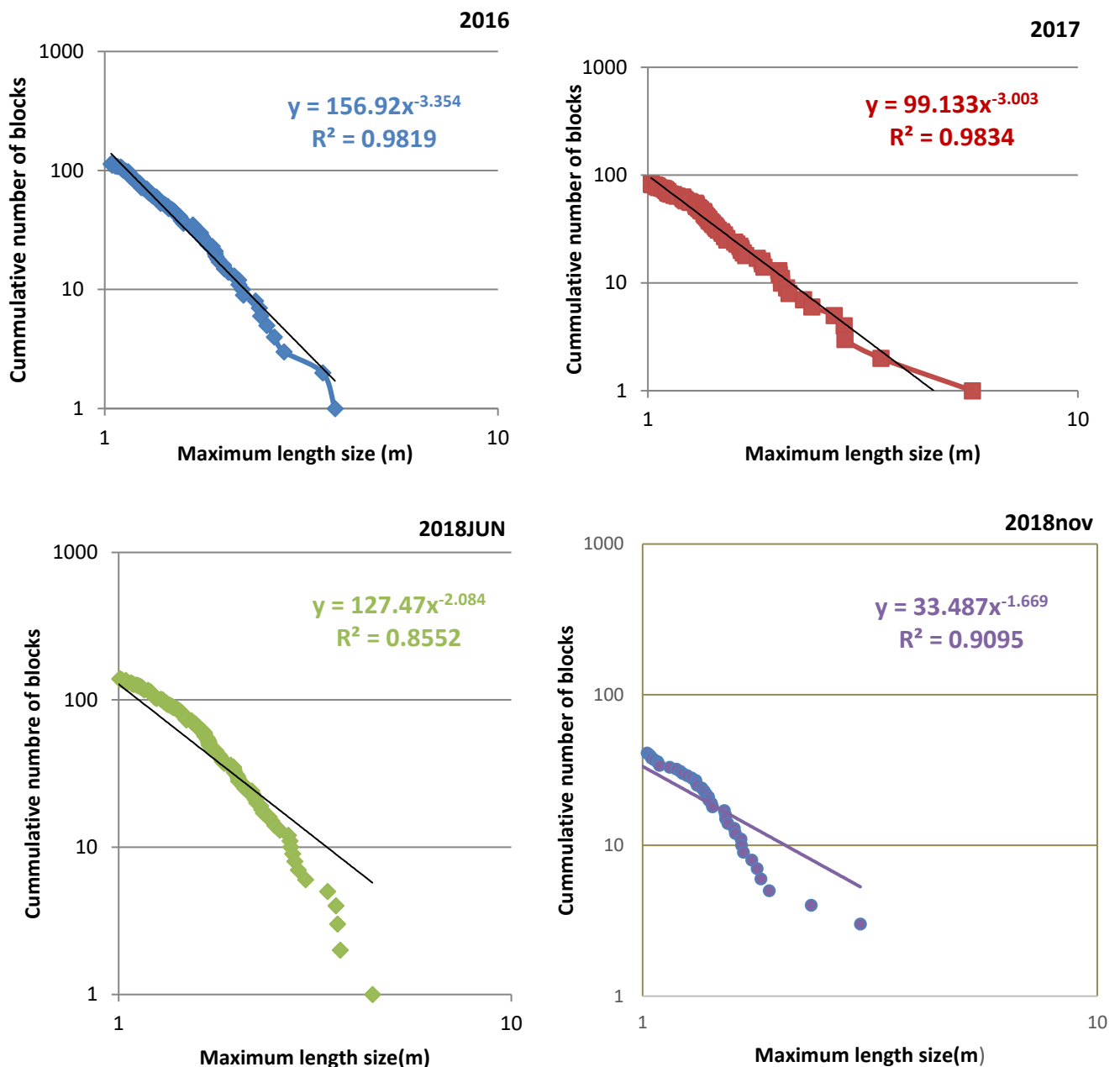


Figura. 42. Gráficos de dispersión de los años 2016 (azul), 2017 (rojo), 2018Jun (verde), y 2018NOV (morado con su correspondiente línea de tendencia).

Además, se ha realizado una gráfica de dispersión general de los cuatro casos (Figura. 43.), confirmando en rasgos generales que, según la segunda ley de Newton o principio fundamental de la Dinámica, la aceleración de los bloques depende del valor de sus masas (masa=Fuerza/aceleración). Los gráficos de dispersión presentes, reflejan una línea de tendencia continua indicando que, cuanto más pequeños sean los bloques, más fáciles serán de mover y por lo tanto, la cantidad de bloques desprendidos será mayor.

Esta gráfica de dispersión general, se presenta como una curva granulométrica en la que se puede observar que el tamaño de bloques es menor para el año 2018NOV, seguido de la curva del año 2017, y la de 2016. Por el contrario, el tamaño de bloques es mayor para el año 2018JUN. Si analizamos en detalle esta gráfica (Figura.39.), se puede observar que aproximadamente se han medido entre 200 y 500 bloques para cada ortofoto, de estos bloques medidos se ha registrado que el mayor tamaño de bloque registrado se encuentra en la ortofoto de 2017.

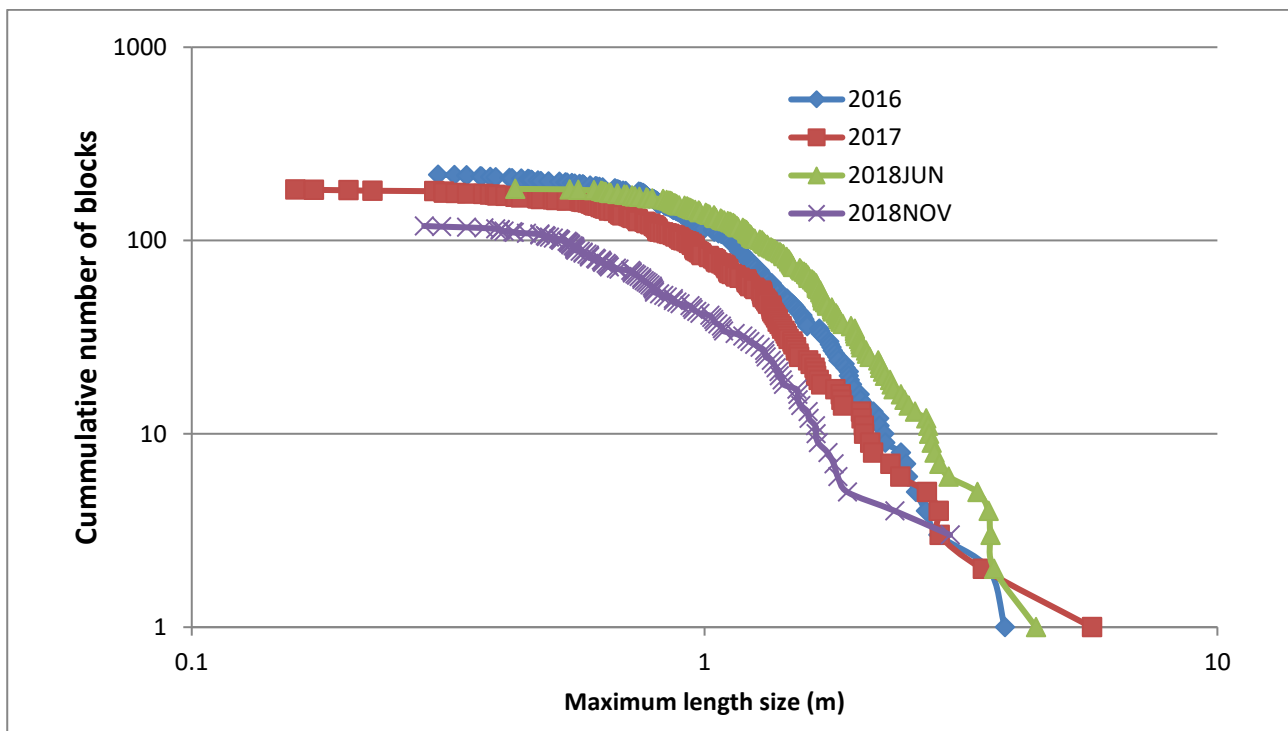


Figura. 43. Gráficas de dispersión general de los cuatro casos; ortofoto 2016,2017,2018JUN, y 2018NOV, en la que su función es de curva granulométrica indicando si el tamaño de bloques desprendidos es mayor o menor.

A continuación, en la Figura. 44. se puede observar una gráfica equivalente a la Figura. 43. donde se pueden observar las líneas de tendencia y pendientes que sigue cada curva. En ella, podemos observar como en los años 2016,2017, y 2018JUN, esta línea de tendencia presenta la misma pendiente, siendo la de 2018NOV la diferente a las anteriores ya que presenta un descenso considerable en la línea de tendencia, y así mismo, en la pendiente.

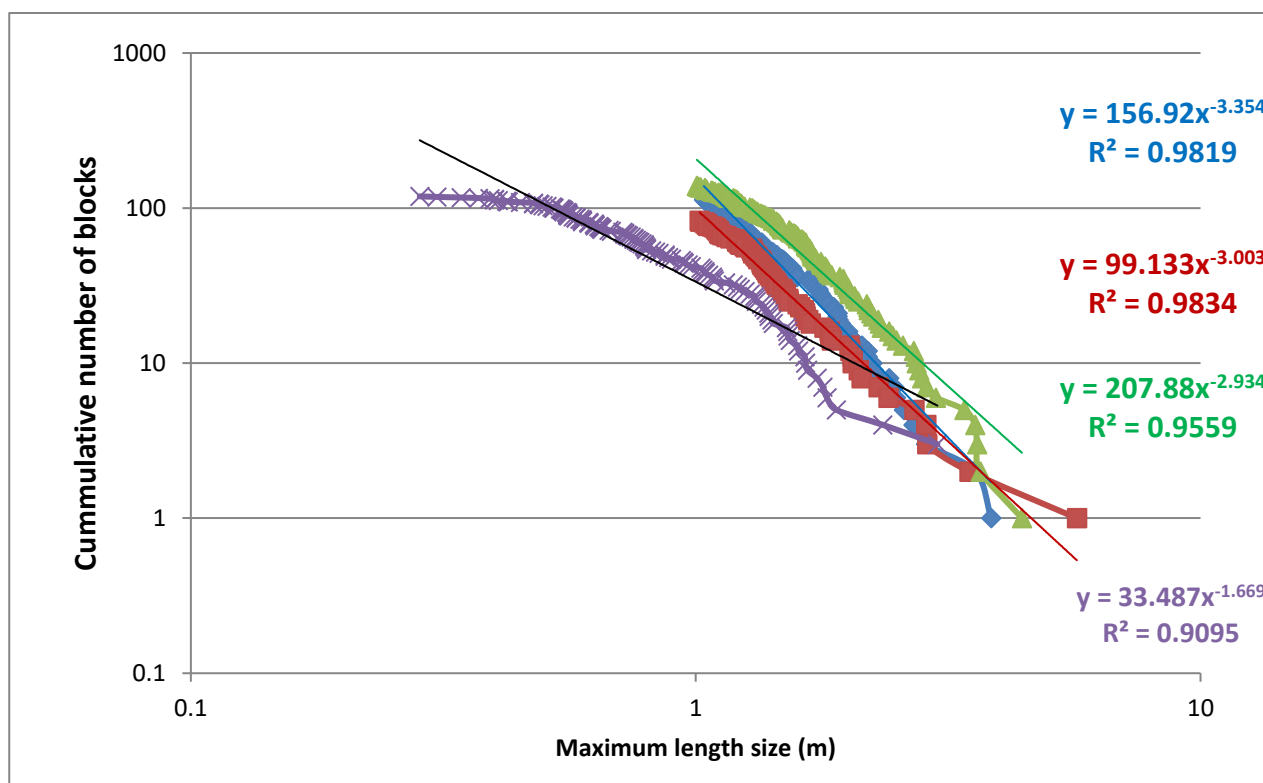


Figura. 44. Gráfica de dispersión general de los 4 casos; ortofoto 2016, 2017, 2018JUN, y 2018NOV, donde se puede observar la línea de tendencia que sigue cada curva con su correspondiente pendiente.

Se deduce que las caídas de bloques son debidas a las condiciones pluviométricas y topográficas de la zona, ya que en zonas de alta pendiente el bloque sigue su trayectoria, corroborando que, si el bloque es grande la energía que requiere de desplazamiento será mayor que la de un bloque pequeño.

Recopilando los datos pluviométricos de los años 2016 a 2018 calculados en mm se obtiene que, las precipitaciones en el transcurso de la ortofoto obtenida en 2017 a la ortofoto obtenida en junio de 2018, los eventos de precipitación registrados fueron con diferencia mucho mayores al resto (Figura. 44.). Cabe destacar, que el registro de precipitaciones ocurrido desde la ortofoto realizada de mayo de 2016 a junio de 2017 presenta valores de precipitación altos. También se ha observado la intensidad de lluvias torrenciales en fechas señaladas. La intensidad registrada de estas precipitaciones se ha clasificado como precipitación débil a moderada, generalmente con valores $\leq 2\text{mm/h}$ a $\leq 15\text{mm/h}$. Cabe destacar, que en el año 2017 se han llegado a registrar en una hora valores de $24,6\text{mm/h}$, indicativo según la clasificación de precipitaciones con respecto a la intensidad de caracterizarse por ser precipitación fuerte. Las tablas de precipitaciones registradas junto con las tablas correspondientes aparecen en el anejo.6.

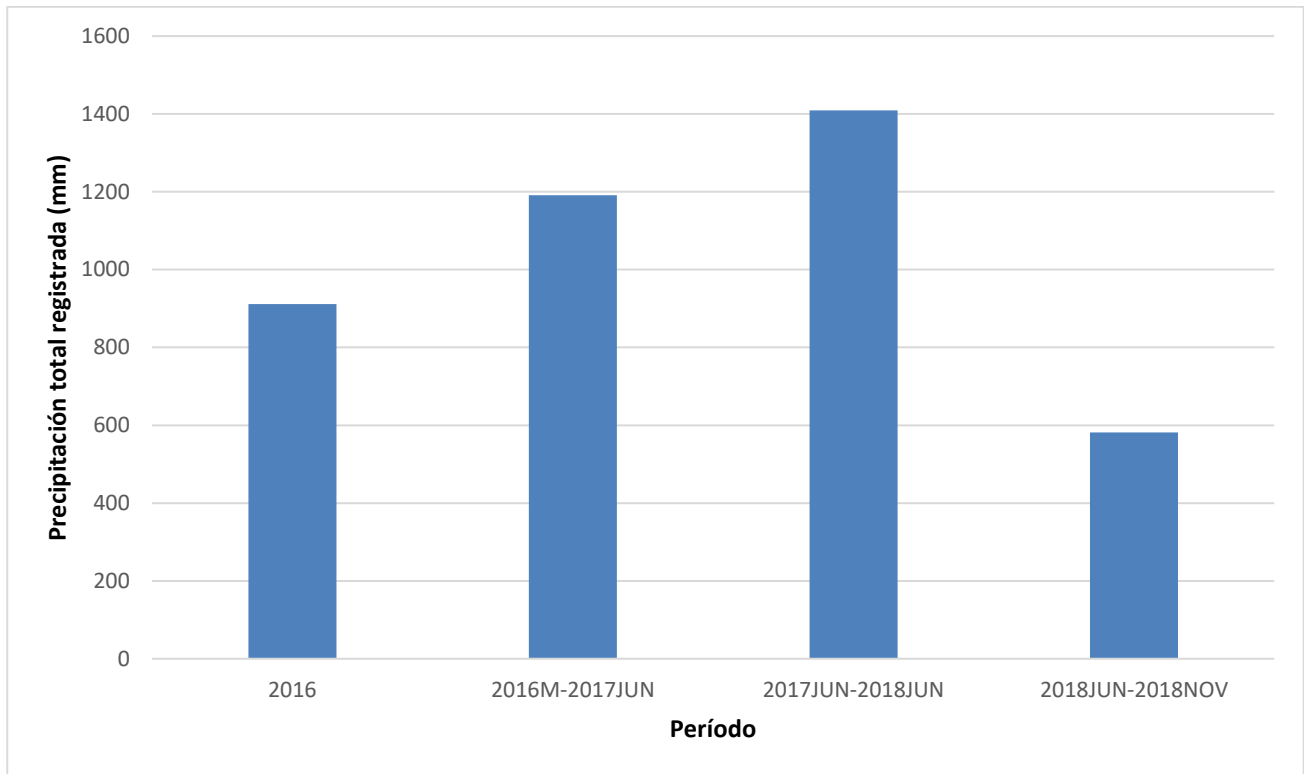


Figura. 45. Precipitación total registrada entre ortofotos.

A posteriori, se procede a seleccionar el volumen de los bloques más grandes desprendidos, considerados representativos en este estudio. Para realizar el cálculo de volumen de estos bloques se ha seguido la fórmula que se ha mencionado en el apartado 4.4.1.2. bloques. Las tablas realizadas con los valores obtenidos se pueden ver en el anejo.5.

Una vez calculado el volumen de los bloques grandes correspondientes a cada año se hace una recopilación en el siguiente histograma (Figura. 46., y anexo.7.), en el que se puede observar que el volumen de bloques desprendidos mayores a dos metros fue mayor en la ortofoto correspondiente a junio de 2018 seguida de 2016.

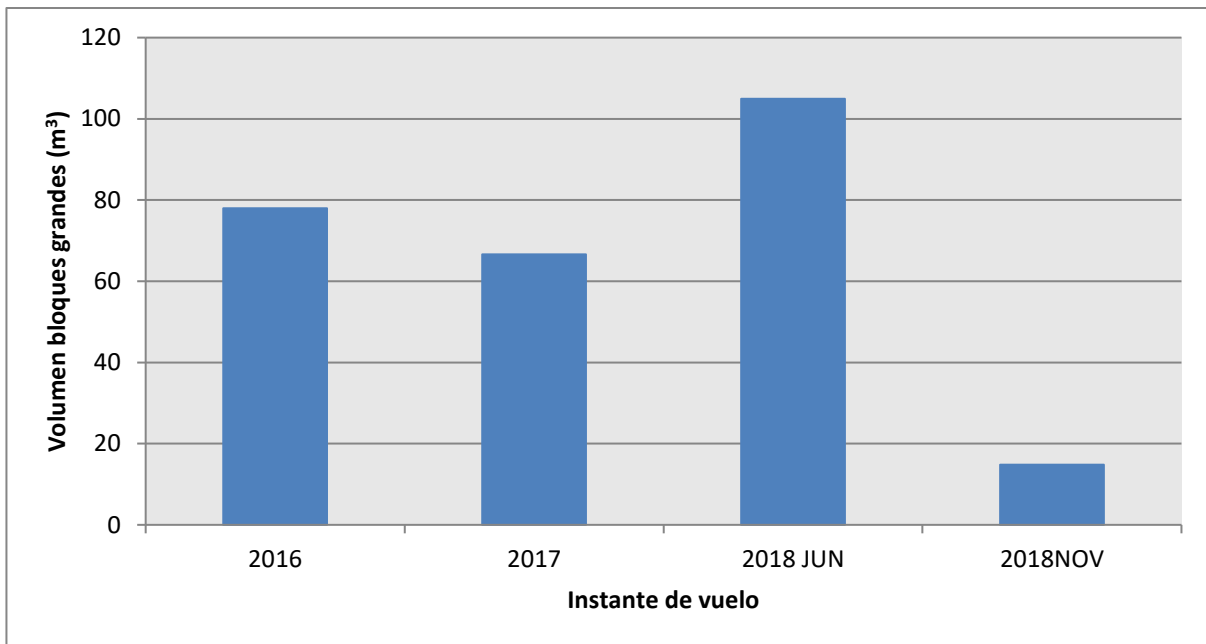


Figura. 46. Histograma en el que se presenta el volumen de los bloques mayores a dos metros correspondientes al 2016, 2017, 2018 JUN y 2018 NOV.

Si se compara la Figura. 43., la Figura. 45., y la Figura. 46., se puede asociar la cantidad de precipitación caída en los cuatro eventos, con el volumen de bloques grandes desprendidos. Por lo tanto, se llega a deducir que el factor del agua debido a los eventos de precipitación ocurridos, tuvo un papel importante en la caída de bloques de un año con respecto a otro.

Si a la gráfica perteneciente a la figura.39. se le añaden los valores de precipitación obtenidos, podemos observar como los valores concuerdan con la cantidad de bloques desprendidos con respecto al tamaño.

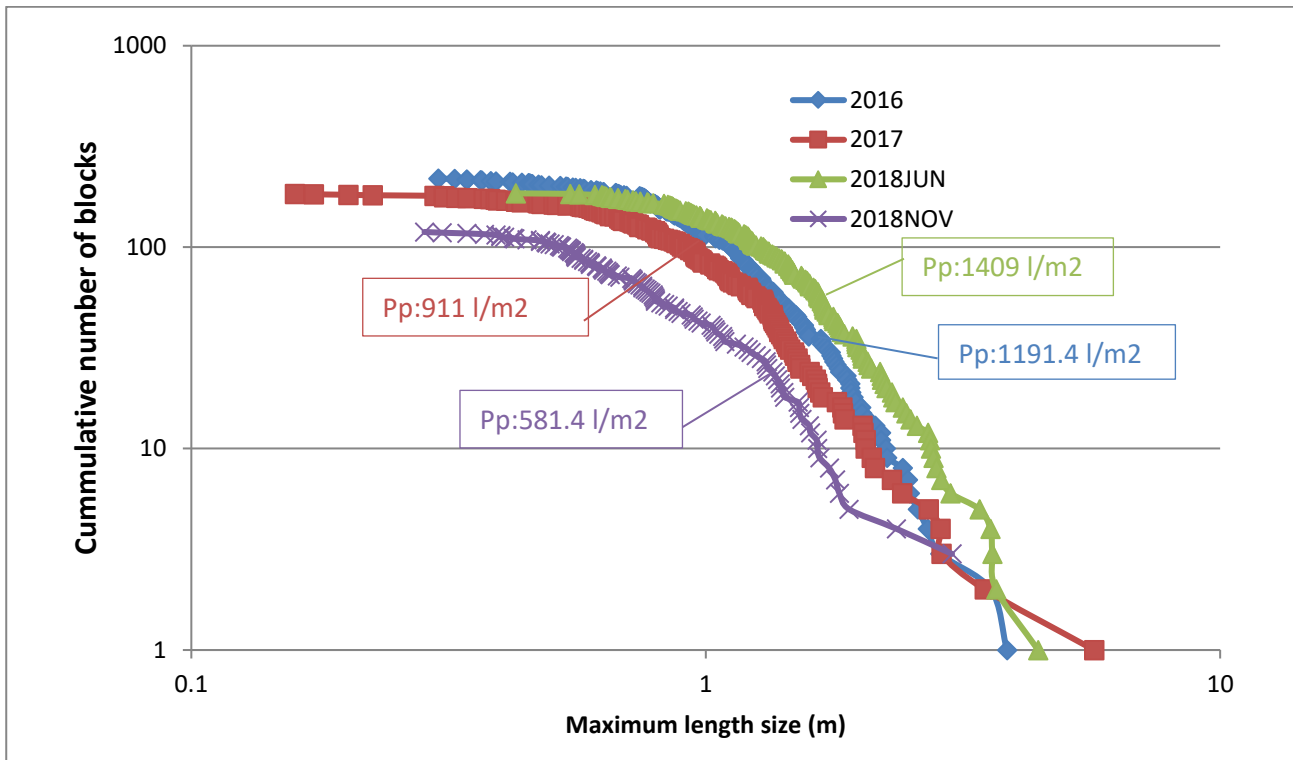


Figura. 47. Gráfica granulométrica de los bloques medidos en cada ortofoto junto con los datos pluviométricos (Pp).

Si añadimos los datos pluviométricos de la figura anterior a una gráfica general, con el volumen de los flujos torrenciales auscultados mediante los sensores instalados en el canal en cada año (Figura. 48., y anejo.7.), y con los mayores eventos de precipitaciones registrados, se puede confirmar que una de las causas posibles de debris Flow y rockfall en el barranco de Rebaixader es debido a las precipitaciones torrenciales. Es así, ya que se puede observar como los valores pluviométricos se presentan en ascenso en el momento que se dan los mayores eventos volumétricos de material desprendido.

La siguiente gráfica con sus correspondientes tablas se pueden observar en el anejo.7.

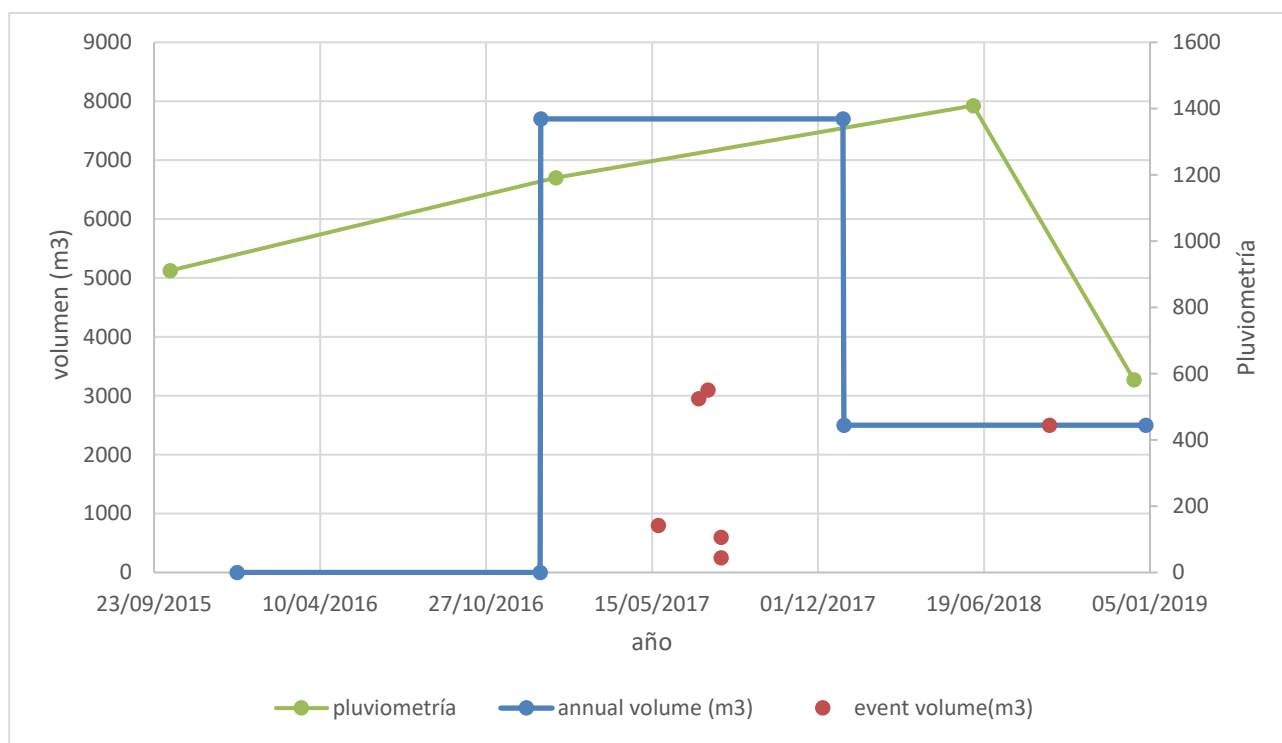


Figura. 48. Gráfica general en la que se relaciona el volumen anual de los flujos torrenciales auscultados mediante los sensores instalados en el canal en cada año, los eventos de precipitaciones más grandes registradas, y los datos pluviométricos.

5.2. Nubes de puntos 3D

Calcular la erosión y depósito producida con el transcurso del tiempo es un objetivo clave en este proyecto, para ello, es necesario disponer de los archivos DEM (modelos de elevación digital) que son archivos de tipo ráster donde cada uno de los píxeles tiene un valor de cota asignado. Como previamente se ha comentado en la metodología (apartado 4.4. Fase 4: Fase de Post- procesamiento) para obtener estos archivos DEM, se han realizado las alineaciones de cada una de las partes del barranco.

A continuación, se presenta un ejemplo de las alineaciones llevadas a cabo (Figura. 49., y Figura. 50.), con los datos de RMS y la matriz conseguidos, tanto en alineación manual como automática. Lo reflejado en estas imágenes se ha llevado a cabo para cada uno de los archivos a alinear. El resto de algunas de las imágenes alineadas se podrá ver en el anejo. 10 y anejo 11.

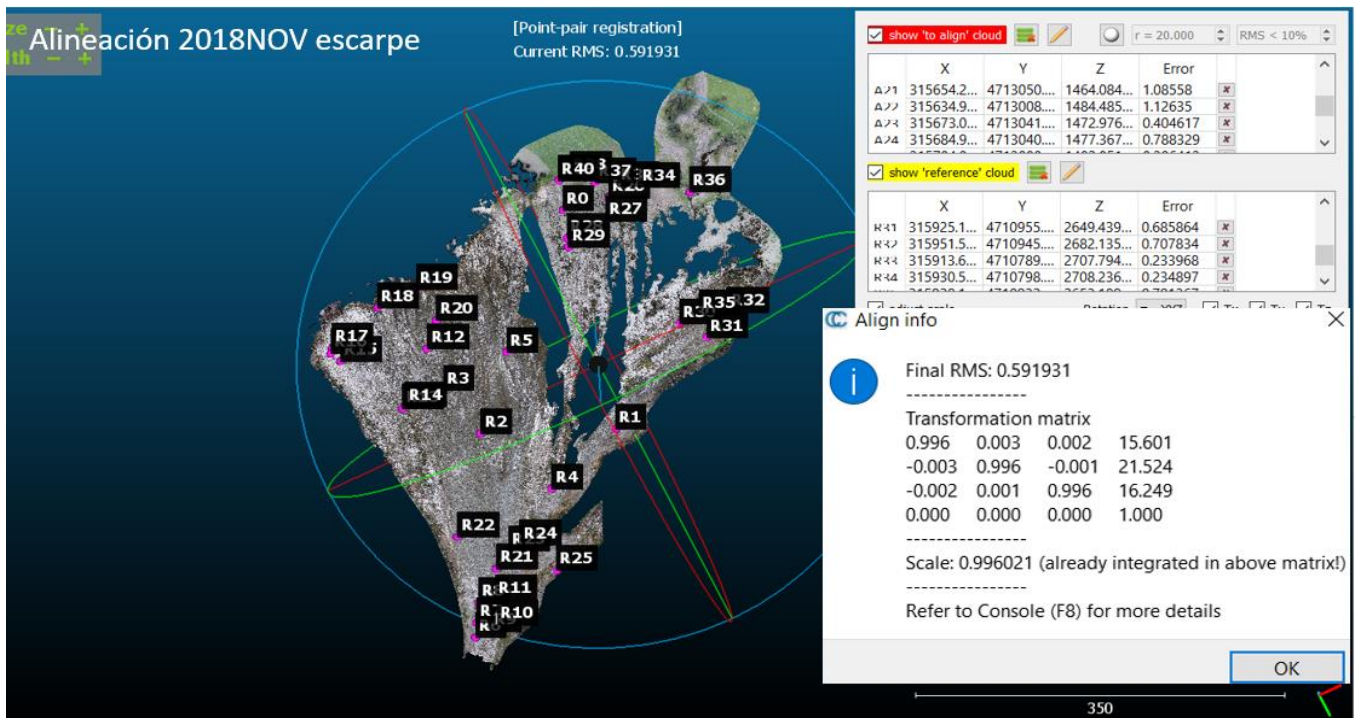


Figura. 49. Imagen en la que se muestra un ejemplo de la alineación realizada en el programa CloudCompare con los valores de RMS, en este caso la del escarpe de 2018NOV.

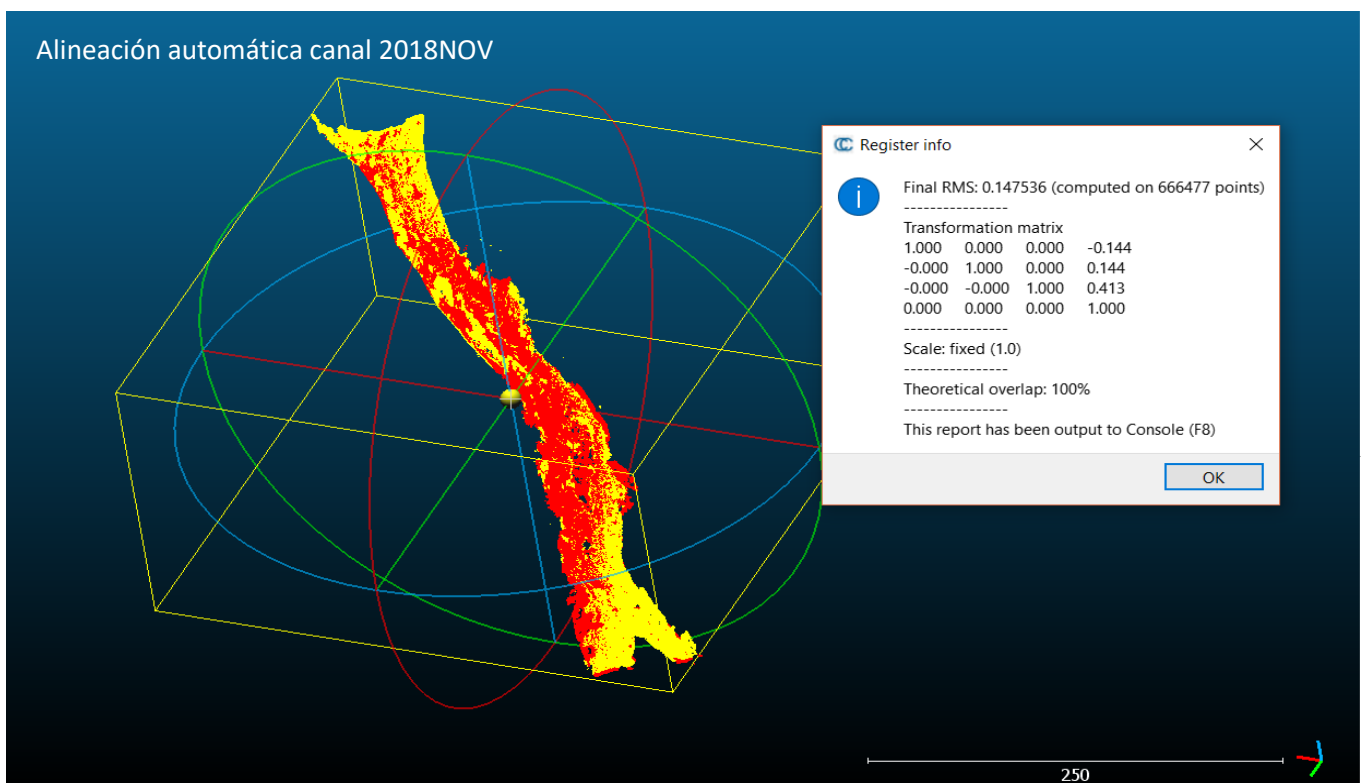


Figura. 50. Ejemplo de alineación automática realizada para el canal de 2018NOV.

Una vez alineadas todas las partes, se van a crear los DEM de cada uno de los archivos a una resolución de 0.5 cm/píxel y un promedio medio para obtener un modelo de elevación digital más preciso con el que poder obtener buenos resultados (Figura.51., Figura.52., y Figura.53.). Los DEMs obtenidos, se pueden ver en el anejo. 8.

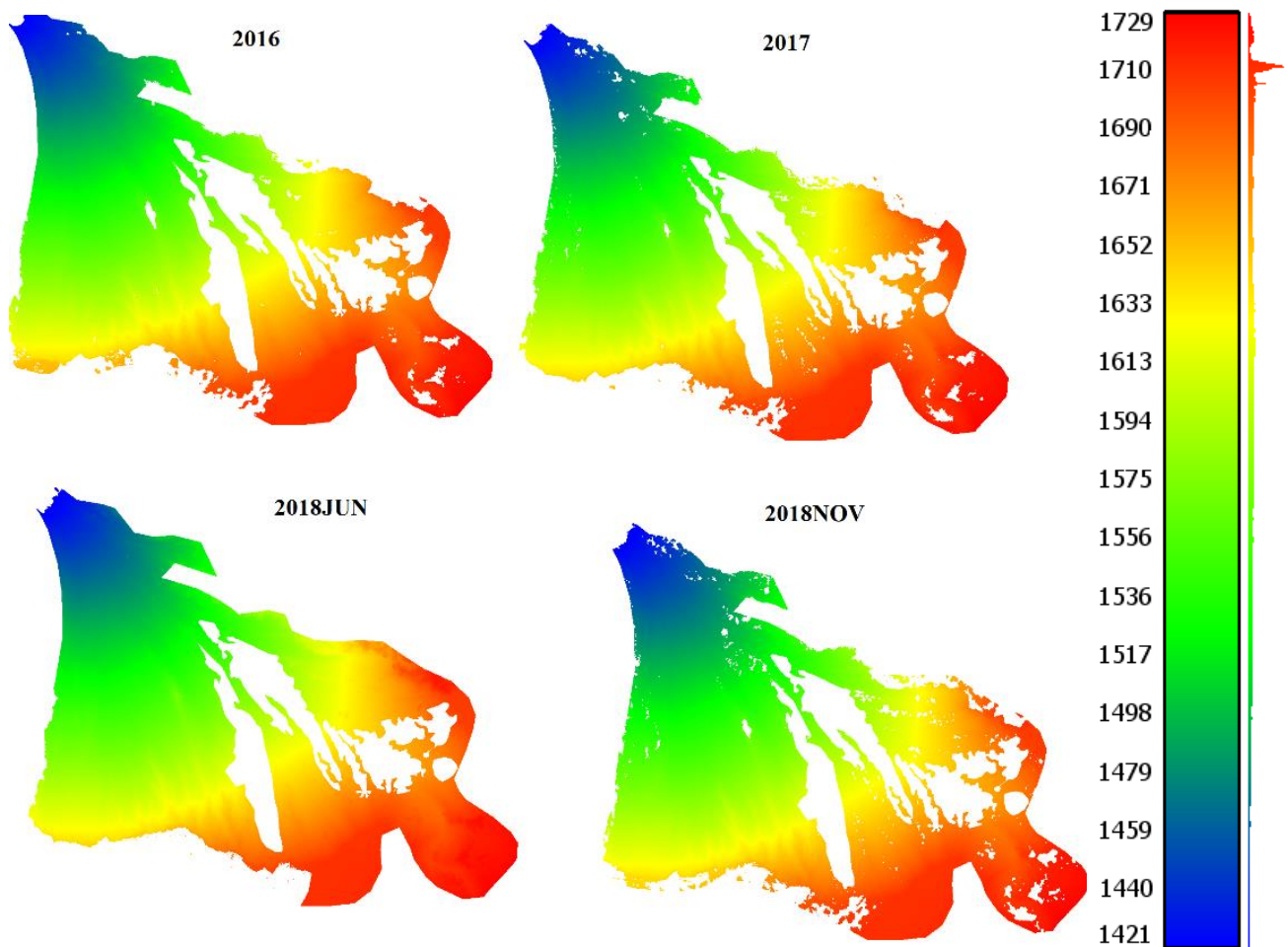


Figura. 51. DEMs del escarpe obtenidos en CloudCompare.

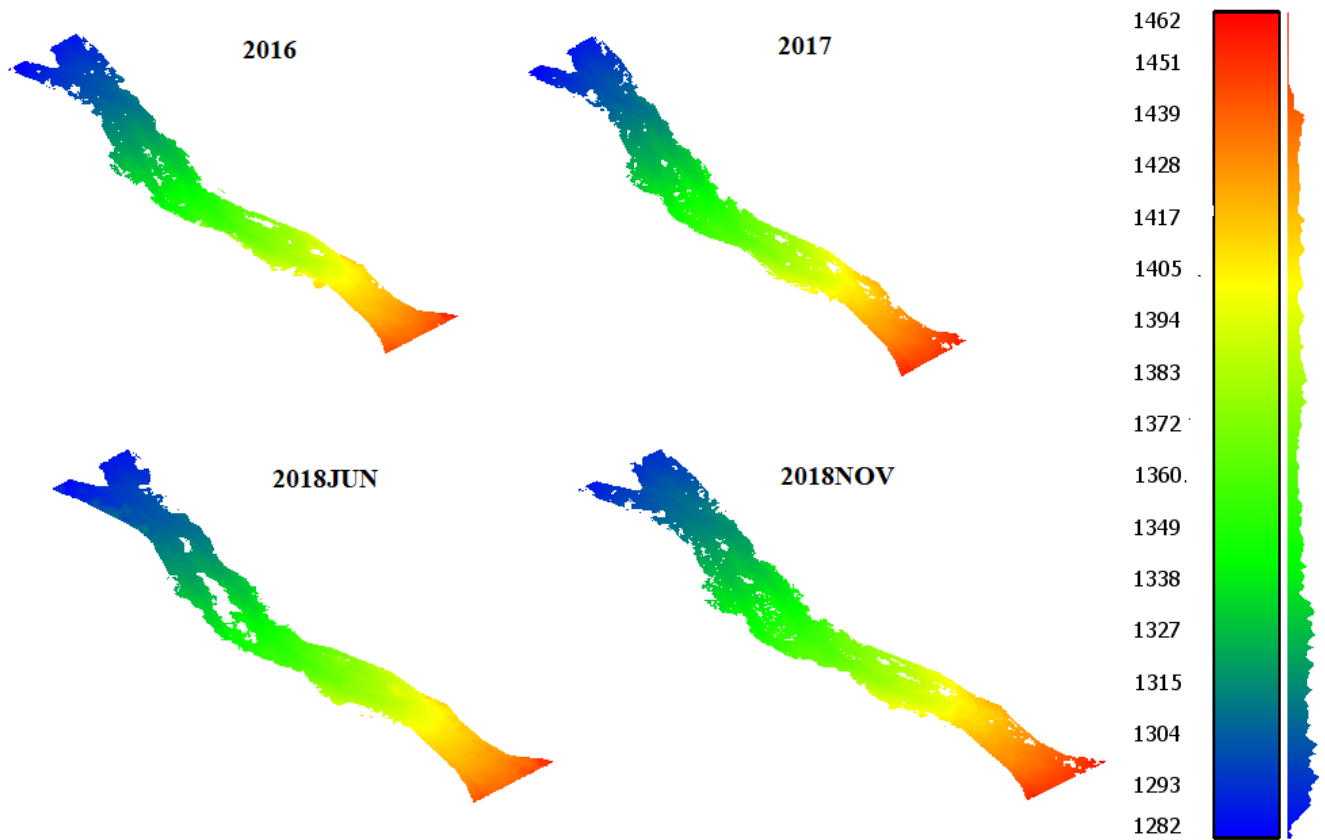


Figura. 52. DEMs del canal obtenidos en CloudCompare.

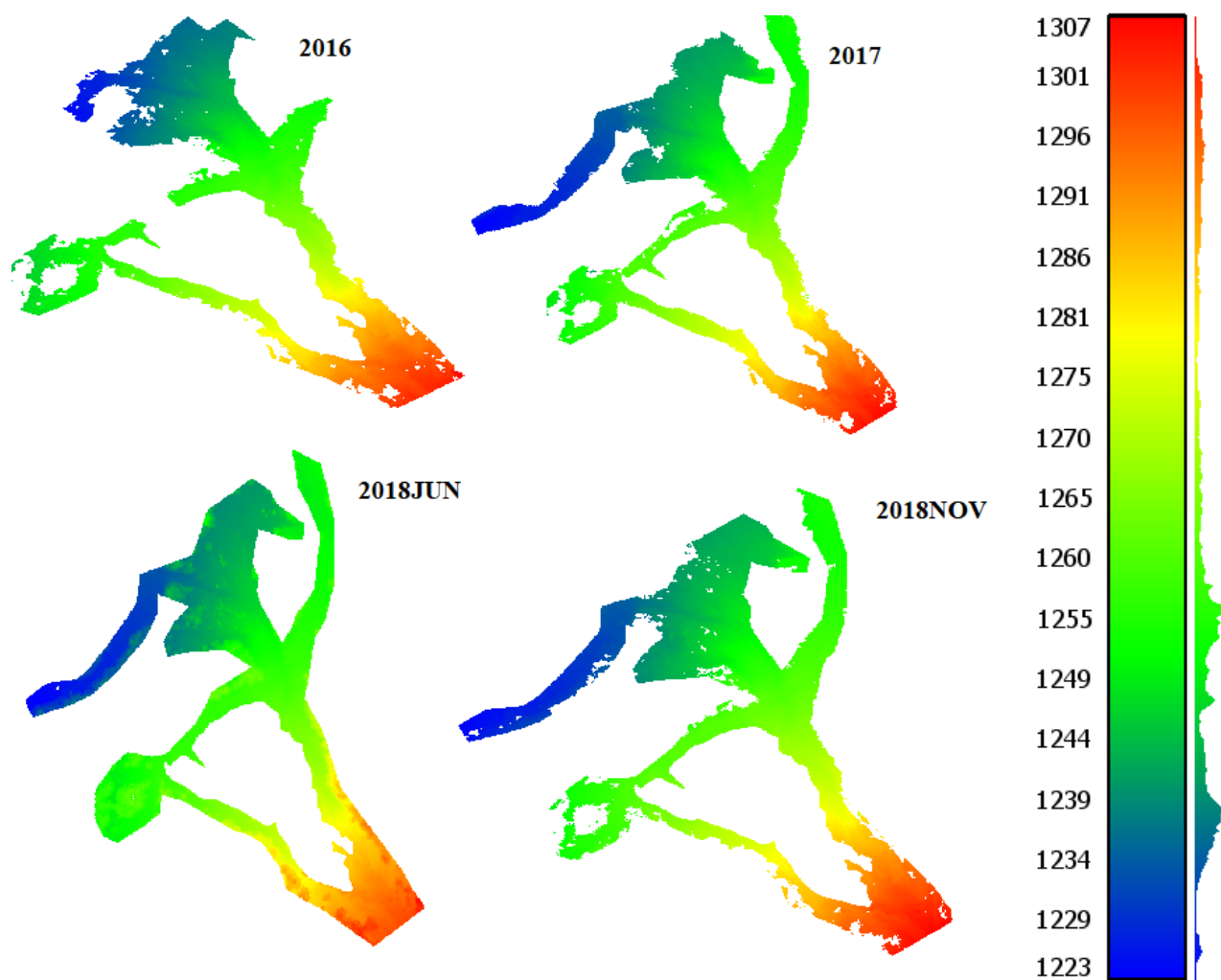


Figura. 53. DEMs del depósito obtenidos en CloudCompare.

5.3. DEMS

Con estos archivos realizados con el programa CloudCompare (Figura. 51., Figura. 52., y Figura. 53.), y posteriormente diseñados con color y escala propia en el programa Qgis (Figura. 24., Figura. 25., Figura. 26., y anejo.8.), se puede determinar la erosión y depósito total del barranco al completo, y en detalle de algunas zonas específicas. Cabe destacar, el papel tan importante que ejercen las alineaciones previas realizadas para que el trabajo a posteriori sea efectivo.

Realizar este análisis, va a suponer conocer mejor la actividad de la cuenca y determinar las zonas en las que se está desarrollando el desprendimiento de bloques, zonas de acumulación de material, y en conjunto las zonas más críticas en cuanto a acumulación de materiales.

Por ello, se va a calcular la erosión-depósito tanto con el programa Qgis, como con el programa CloudCompare para posteriormente hacer una correlación de los datos obtenidos.

Cargando todos los DEMs en el programa Qgis, se van a crear tres capas shape en forma de polígono, las cuales van a corresponder, una al contorno del escarpe, otra al canal y otra al depósito. Es importante crear esta capa shape, para que el programa funcione a la hora de ejecutar las diferencias entre DEMs cogiendo los mismos píxeles del mismo, y no provoque error, permitiendo así obtener el mapa de diferencias. También, se crearán capas shape en forma de polígono correspondientes a “máscaras” para zonas específicas que son destacables, y necesarias de comentar (Figura. 55., y Figura. 57.). Una vez realizado, se procede a utilizar la calculadora ráster, en la que se van a restar los DEMs, de cada una de las partes (área fuente, canal, depósito), de la siguiente forma:

- DEM 2017 -DEM2016
- DEM 2018JUN- DEM 2017
- DEM 2018NOV-DEM 2018JUN
- DEM 2018JUN- DEM 2016.

Al restar los DEMs de esta manera, se van a obtener valores negativos, correspondientes a erosión, y valores positivos, correspondientes a depósito (Figura. 54., Figura. 56., y Figura. 58.). Estas figuras, aparecen con mayor amplitud en el anejo.9.

Cabe destacar, que se ha considerado una misma escala de diferencias para cada una de las partes, considerando zonas invariantes las que van desde el rango -0.15 a 0.15.

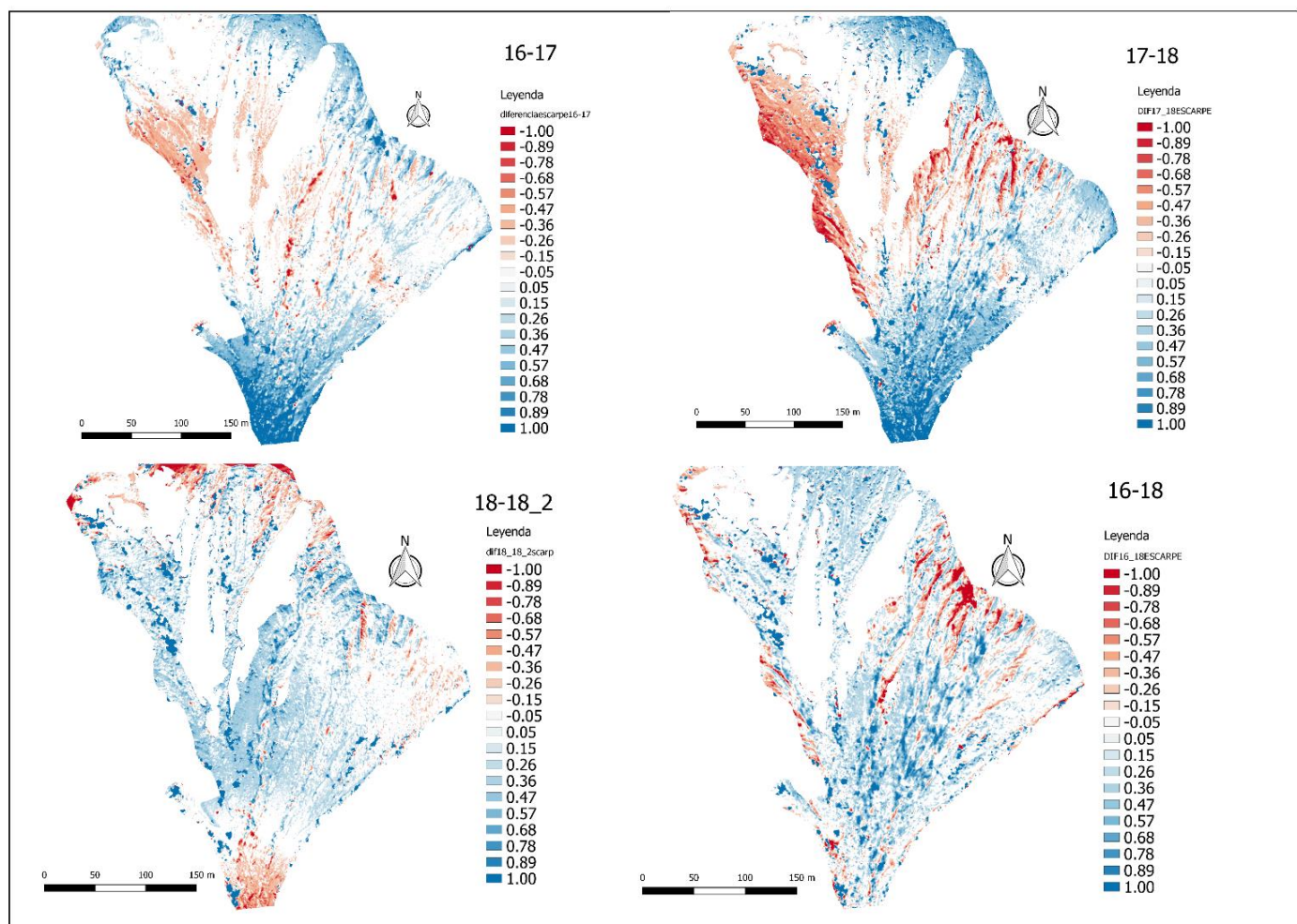


Figura. 54. Mapa de diferencias del área fuente donde se presentan los diferentes saltos de tiempo, y en los que se observan las zonas de erosión y depósito.

De manera general, el mapa de diferencias del área fuente, presenta erosión en la zona del escarpe, mientras que la zona de “embudo” previo al canal, presenta depósito o erosión dependiendo de la ortofoto, lo cual se explicará a continuación.

El mapa de diferencias del área fuente correspondiente al año 2016-2017 presenta erosión en la zona central, y depósito en los extremos. De manera particular, la zona superior más cercana al escarpe, presenta valores positivos indicando la acumulación de bloques de un año con respecto al otro. La zona central abarca gran parte del escarpe con valores erosivos, algo teóricamente lógico por la pendiente tan pronunciada que presenta esta zona. Sin embargo, la zona de entrada al canal, tiene valores positivos debido al estrechamiento del mismo, y a la acumulación de los bloques desprendidos por el efecto de la gravedad que van en dirección de la menor pendiente.

Con respecto al mapa de diferencias obtenido para el año 2017 con junio de 2018, se puede observar erosión en la zona cercana al escarpe, correspondiente a la zona donde se encuentran las cárcavas, obteniendo valores de erosión de hasta – 1 metro, junto con la zona central, la cual también se presenta erosiva. Teóricamente, esto es correcto ya que en los debris flow según la morfología que adquieren, las pendientes mayores a 10º son mayoritariamente erosivas, al igual que ocurre en el área fuente del barranco Rebaixader.

El mapa de diferencias realizado para el transcurso de tiempo de junio de 2018 a noviembre de 2018, presenta mayoritariamente depósito debido a la capa de nieve presente en noviembre. La zona previa al canal se presenta de color rojo debido a la ausencia de nieve en esa zona, por ello se han obtenido valores erosivos, los cual lleva a obtener valores no reales. Es importante resaltar, que aun así en la zona de las cárcavas se presentan zonas erosivas, características de la zona del escarpe, indicando que la diferencia de un año con respecto a otro está bien realizada.

Finalmente, en el mapa de diferencias obtenido del año 2016 a junio de 2018, se pueden observar las grandes diferencias, obteniendo grandes valores de erosión en la zona del escarpe, y valores de depósito en el resto del área fuente con un promedio de 0.7 metros. Cabe destacar, que, a pesar de presentar mayoritariamente depósito, la zona central del área fuente, presenta subcanales erosivos.

La diferencia realizada con respecto al mapa de diferencias del año 2016 a noviembre de 2018, no se realiza, por la presencia de nieve, que incide a obtener datos inciertos.

Estos valores tan altos en erosión en el transcurso de una ortofoto a otra pueden ser debido a la ausencia de algunos bloques que se encontraban presentes en una ortofoto y no en otra, y viceversa. Sin embargo, los colores más azules posiblemente sean restos de vegetación.

A continuación, se presenta un área en concreto de la zona del escarpe en la que se puede observar una amplia zona de erosión (Figura. 55.).

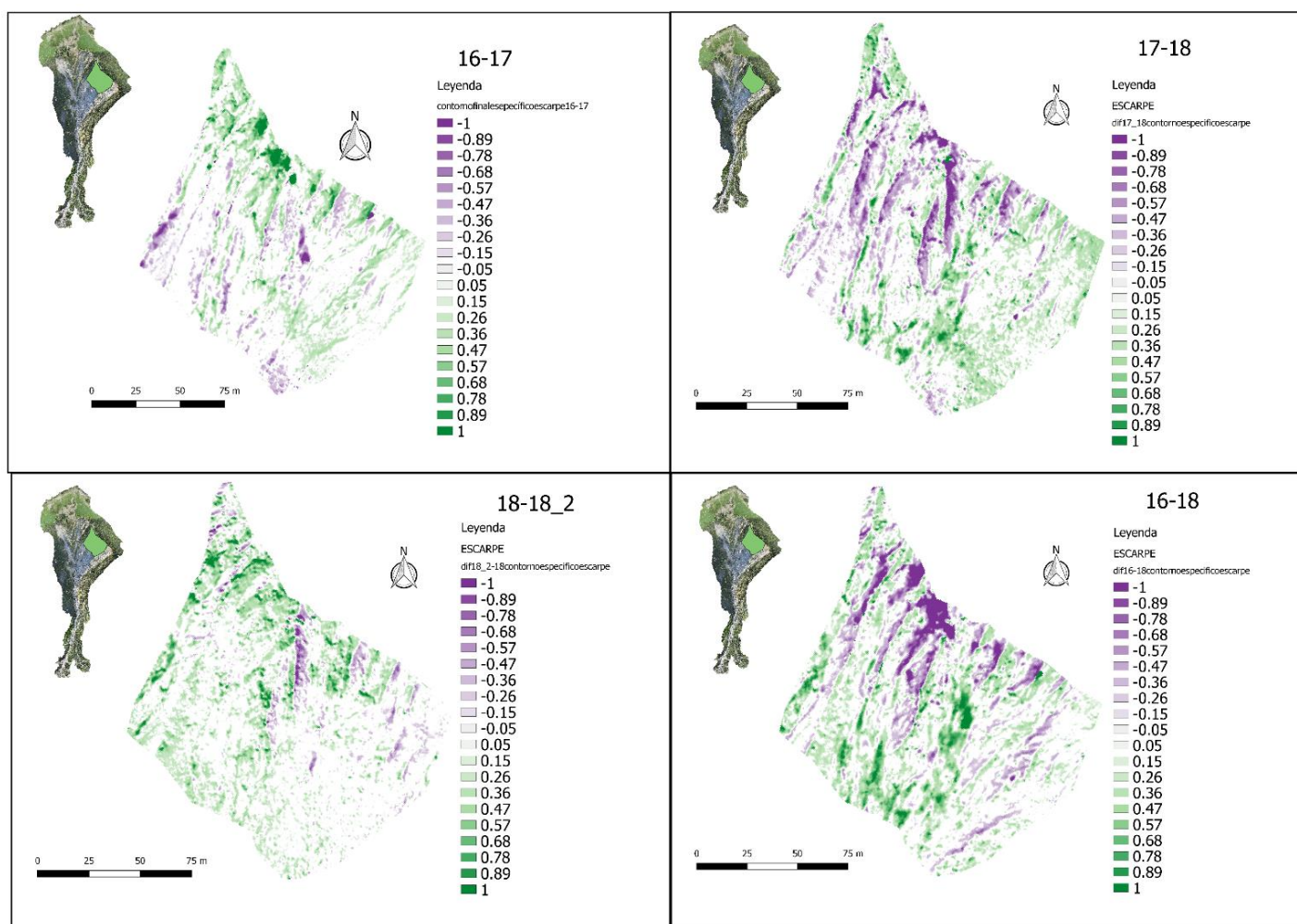


Figura. 55. Contorno específico de una zona concreta del escarpe en la que se han calculado las diferencias en el transcurso del tiempo.

De manera general, se puede observar una zona concentrada con valores erosivos, concretamente en la zona superior, mientras que la zona baja presenta mayor zona de acumulación de material. Esta zona llena de cárcavas, limita con el escarpe, por lo que es la zona más crítica en cuanto a la caída de rockfalls por ser la zona con mayor pendiente del escarpe. De manera específica, cabe destacar las imágenes de 16-17, y 18-18_2 en la que apenas se aprecia erosión (Figura. 55.). En el mapa de diferencias correspondiente a 16-17 (Figura. 55.), la causa es debida a la presencia de nuevos bloques en la ortofoto de 2017 que en la ortofoto de 2016 no había. Sin embargo, en el mapa de diferencias de 18-18_2 el motivo por el cual apenas se aprecia erosión (Figura. 55.), es debido a la capa de nieve presente en la ortofoto obtenida en noviembre de 2018, la cual impide calcular el valor real de erosión en ese transcurso de tiempo, ya que, en el momento de calcular la diferencia, la capa de nieve va a ser considerada como depósito.

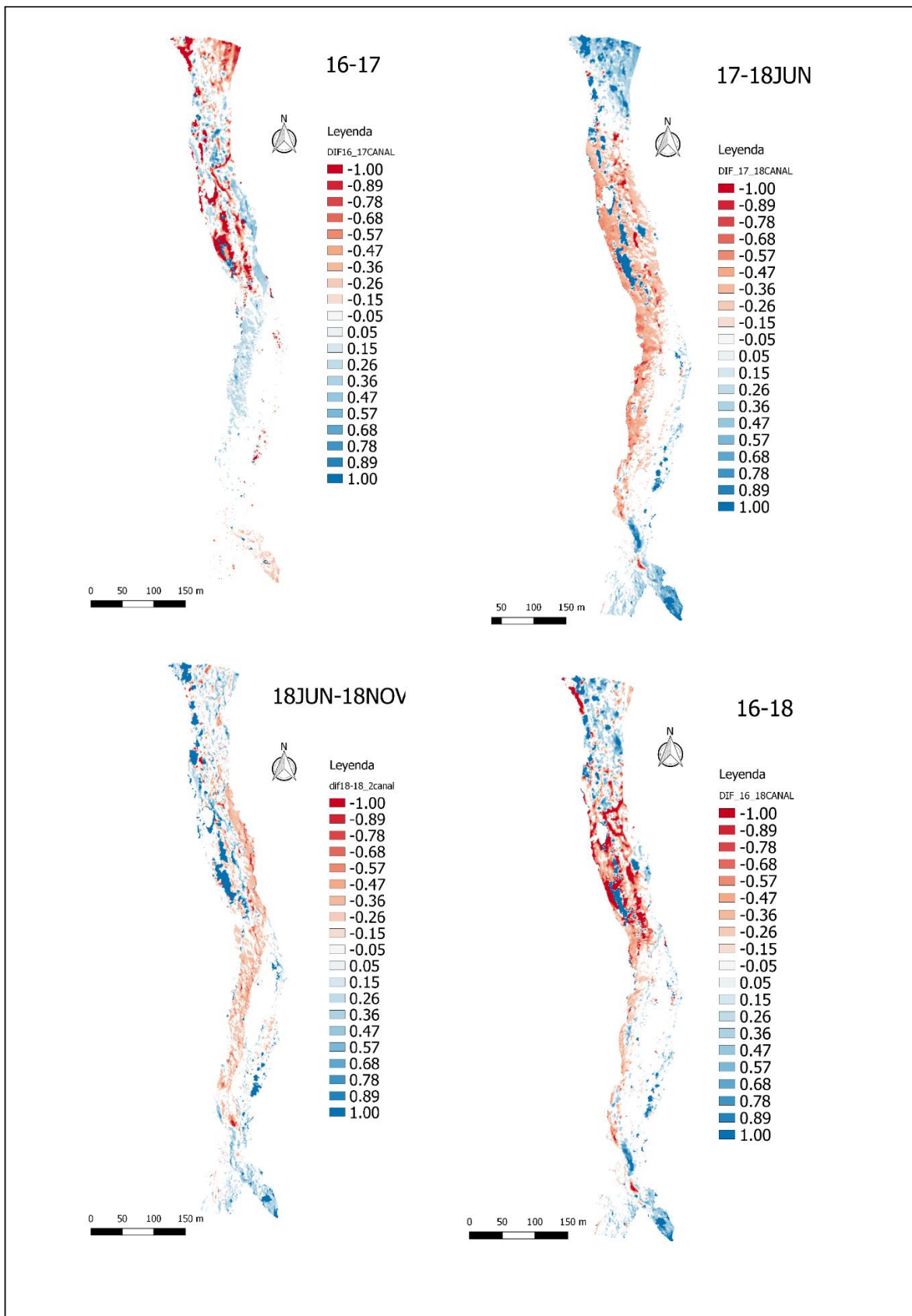


Figura. 56. Mapa de diferencias del canal donde se presentan los diferentes saltos de tiempo, y en los que se observan las zonas de erosión y depósito.

En la zona del canal (Figura. 56.) se puede observar cómo, de manera general, prácticamente ha habido más erosión que depósito en el transcurso del tiempo. En este caso, el contorno elegido para observar la erosión y depósito presenta una zona preferente de erosión y otra zona preferente de depósito. La zona preferente de depósito, el subcanal derecho, corresponde al canal activo por que el los bloques han seguido desde 2017 y siguen actualmente la trayectoria. Mientras, el otro subcanal se presenta erosivo por ser el antiguo canal, y al que desde el año 2017, los bloques no siguen esa trayectoria. Sin embargo, se puede observar lo contrario en el transcurso del año 2016 a 2017.

Calculando la diferencia entre el año 2016 y junio de 2018, de manera general se obtiene depósito en el inicio del canal con valores de hasta 1 metro, posteriormente el centro del canal junto con el subcanal izquierdo, se presenta erosivo con valores de hasta -0.6 metros, mientras que el subcanal derecho presenta depósito con valores de hasta 0.4 metros.

Alguno de los valores máximos de depósito y erosión obtenidos posiblemente sean restos de vegetación o “calvas” realizadas al definir los contornos del canal.

A continuación, se presenta una zona específica del canal en la que se muestran los mayores cambios del mismo en el transcurso de un año con respecto a otro (Figura. 57.).

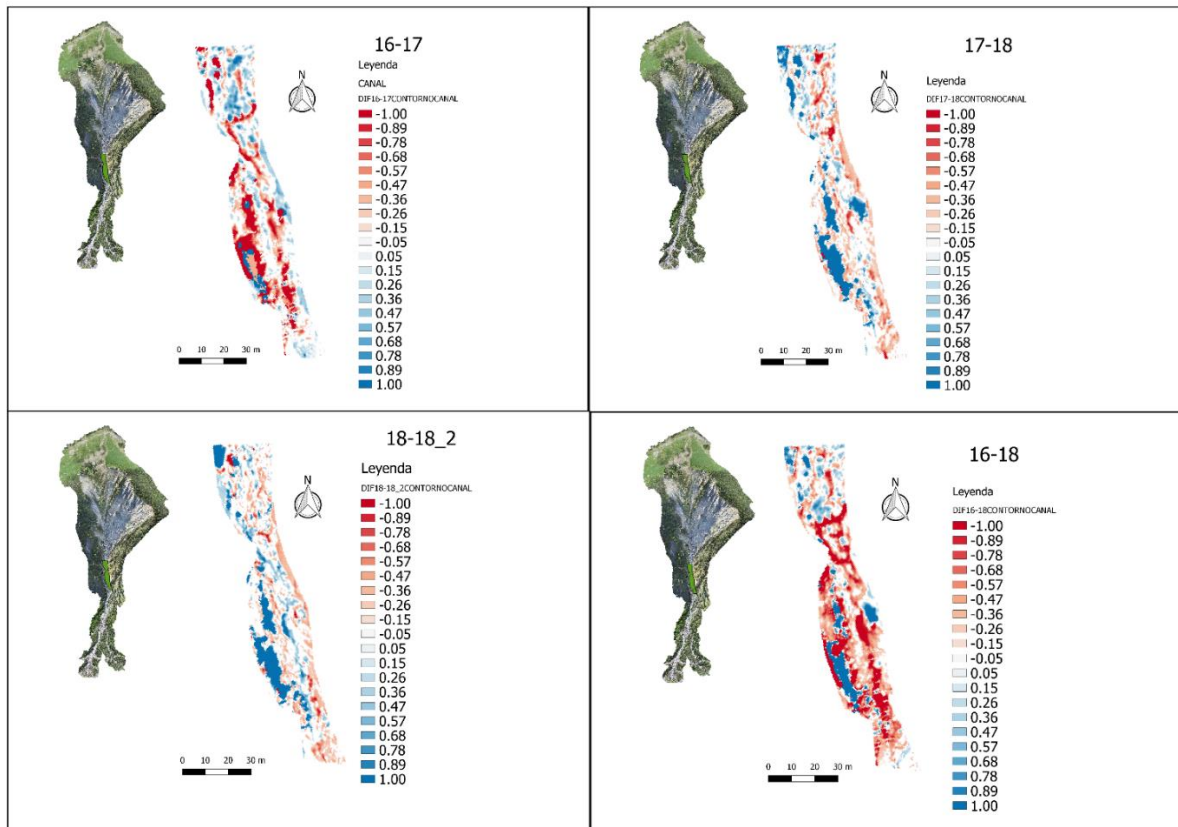


Figura. 57. Plantilla de una zona específica del canal, donde se han aplicado las diferencias con respecto al transcurso del tiempo.

Generalmente en esta zona específica, se pueden observar grandes cambios de un año con respecto a otro. En el transcurso del año 2016-2017 se puede observar una zona predominantemente erosiva donde se pueden observar que las zonas más erosivas definen los subcanales por los que discurre el agua, creando un lixiviado de los materiales depositados previamente arrastrándolos hacia el cono de deyección. Los valores de erosión obtenidos son hasta de 80 centímetros. Sin embargo, en el transcurso del año 2017 a junio de 2018, se pueden seguir viendo algunos subcanales definidos anteriormente por la erosión, aunque en menor medida, ya que se puede observar un aumento depósito de materiales, procedentes del escarpe y laterales del canal. El depósito acumulado en este período se relaciona con la abundancia de precipitaciones torrenciales ocurridas en este transcurso de tiempo, lo cual ha producido un desprendimiento mayor de bloques que se han quedado depositados en esas zonas del canal.

Entre junio de 2018 y noviembre de 2018, la situación que se presenta generalmente es muy parecida a la anterior, aunque con los subcanales definidos por los colores de depósito y no de erosión, suponiendo de nuevo un aumento de material en esa zona. El depósito acumula hasta casi cincuenta centímetros. Las zonas que presentan colores tan fuertes corresponden a zonas de vegetación.

Finalmente se procede a calcular la diferencia más grande, es decir en el transcurso de tiempo de 2016 a junio de 2018. La diferencia se realiza con junio de 2018 ya que la presencia de nieve en noviembre de 2018, puede incitar a obtener valores erróneos. Por lo tanto, con respecto a este contorno, obtenemos un mapa de diferencias prácticamente erosivo, ya que, a pesar de la acumulación producida en algunos períodos de tiempo, la erosión es predominante. Es así porque el propio canal presenta una pendiente mayor a 10°, incitando a los bloques a seguir la trayectoria hacia el cono de deyección.

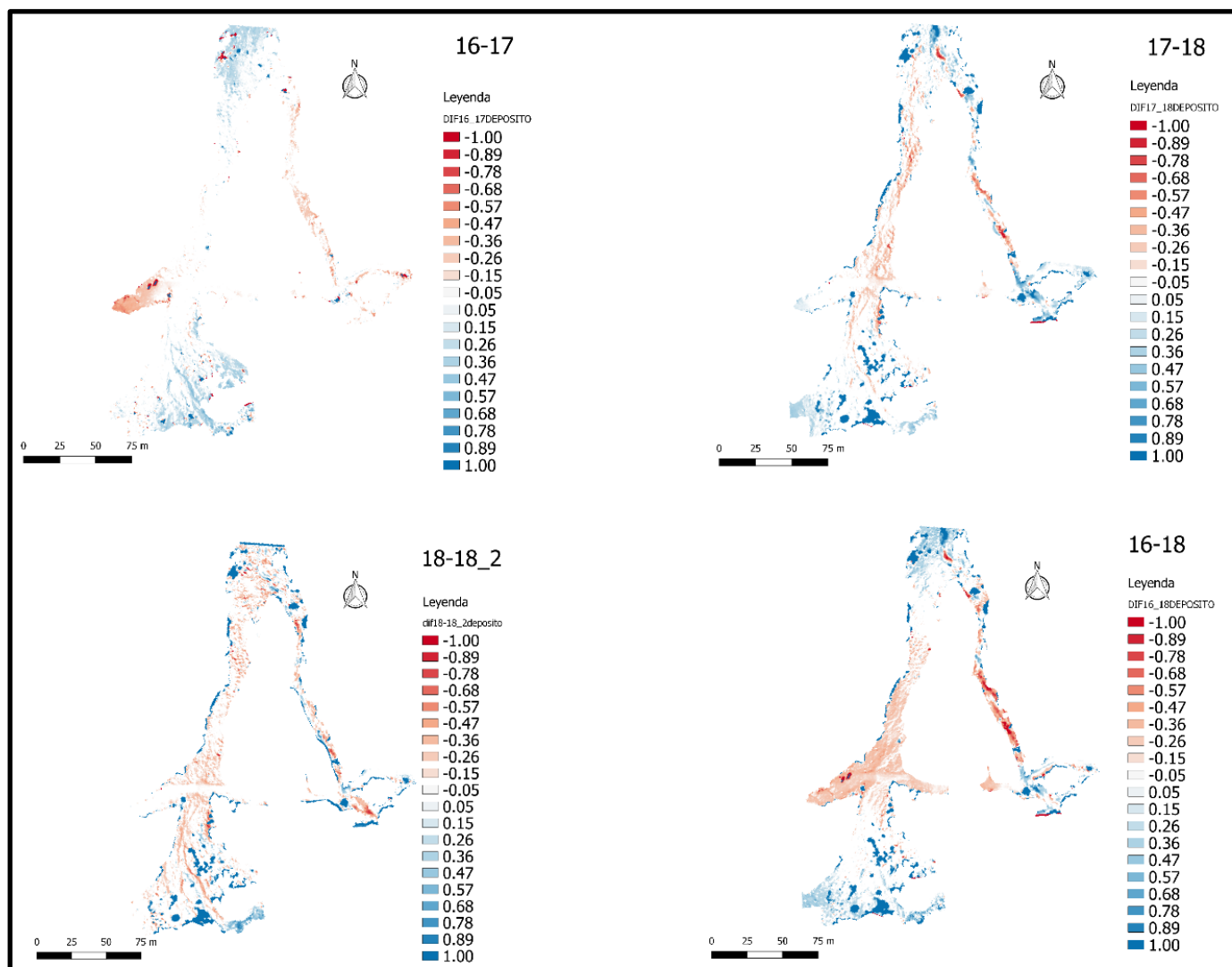


Figura. 58. Mapa de diferencias del cono de deyección donde se presentan los diferentes saltos de tiempo, y en los que se observan las zonas de erosión y depósito.

En el cono de deyección (Figura. 58.), se puede observar como de manera general en el transcurso de un año ha habido depósitos en los extremos de hasta 0.78 metros, tanto en el inicio del cono de deyección como en el final. Esto, es completamente evidente ya que el inicio del cono de deyección es la zona de acumulación de material proveniente del canal, y la zona

final es zona de depósito. La erosión, es apreciable en los sub-canales del propio cono de deyección de hasta -0.5 metros aproximadamente, indicando zona de paso de los bloques.

Finalmente, con el fin de correlacionar ambos softwares utilizados, e indicar cual es más efectivo, se lleva a cabo el mismo proceso de erosión-depósito con el programa CloudCompare para cada una de las partes en la que se ha utilizado un rango de la escala idéntico al utilizado en el programa Qgis, es decir, considerando invariantes los valores que van del rango -0.15 a 0.15. Estos mapas de diferencias aparecerán reflejados más grande en el anejo.12.

Con el programa CloudCompare, se han obtenido estas diferencias para la zona del área fuente (Figura. 59.), en las que se observa de manera generalizada un mapa de diferencias prácticamente equivalente al de la Figura. 54., que es el mapa de diferencias del escarpe obtenido en el programa Qgis.

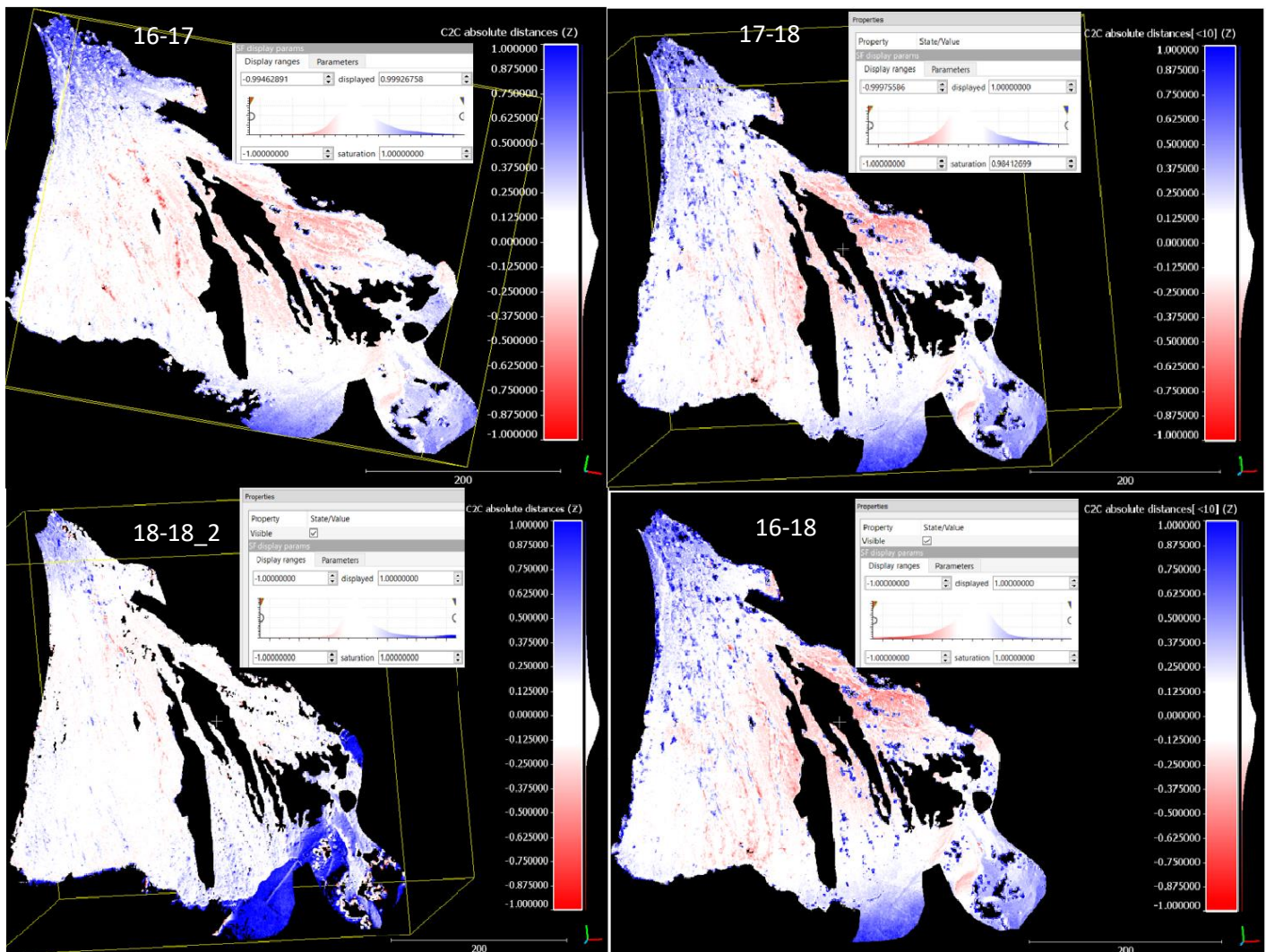


Figura. 59. Mapas de diferencias del área fuente obtenidos con el programa CloudCompare, donde se presentan los diferentes saltos de tiempo, y en los que se observan las zonas de erosión y depósito.

De manera específica, en el transcurso de tiempo de 2016 a 2017 se presenta un mapa de diferencias generalmente erosivo, con valores deposicionales en los extremos. En particular, es importante destacar la zona cercana al área fuente en el que se observan tres manchas azules, indicando con ello, la aparición de tres nuevos bloques en 2017 y que no estaban en 2016. Además, por el color tan intenso que presentan, con valores hasta de 0.90 metros se podría decir que son de un tamaño mediano-grande.

El mapa de diferencias correspondiente a 2017-2018, presenta una zona central-superior del área de escarpe erosiva, aunque hay más presencia deposicional que en el anterior mapa de diferencias. En este mapa de diferencias, se pueden observar muy bien los bloques depositados, incluso hasta su tamaño longitudinalmente.

Con respecto al mapa de diferencias obtenido de junio de 2018 a noviembre de 2018, se obtienen resultados aceptables, ya que a diferencia del mapa de diferencias del mismo período obtenido en Qgis, se obtiene una entrada al canal con un color azul, es decir, un valor deposicional cercano hasta de 0.75 metros, correspondiente por la morfología obtenida a bloques de tamaño mediano. Este mapa se presenta con un color más azulado, debido a la presencia de nieve en la ortofoto de noviembre de 2018, adquiriendo con respecto a la capa de nieve un valor más deposicional, lo que incita a valores erróneos, aunque interesantes.

Finalmente, es interesante destacar la diferencia obtenida en el mapa de 16-18 (Figura. 59.), ya que se observan con claridad los bloques depositados en ese transcurso de tiempo, así como, los bloques que previamente estaban presentes y actualmente no. Esto, genera un mapa de diferencias en el sentido geológico ideal, ya que la zona central-superior es erosional, mientras que la zona central-inferior, es deposicional.

A continuación, se presentan los mapas de diferencias obtenidos en el canal (Figura. 60.), en los que se observan de manera precisa las diferencias, sobre todo cual es el canal activo en cada período de tiempo.

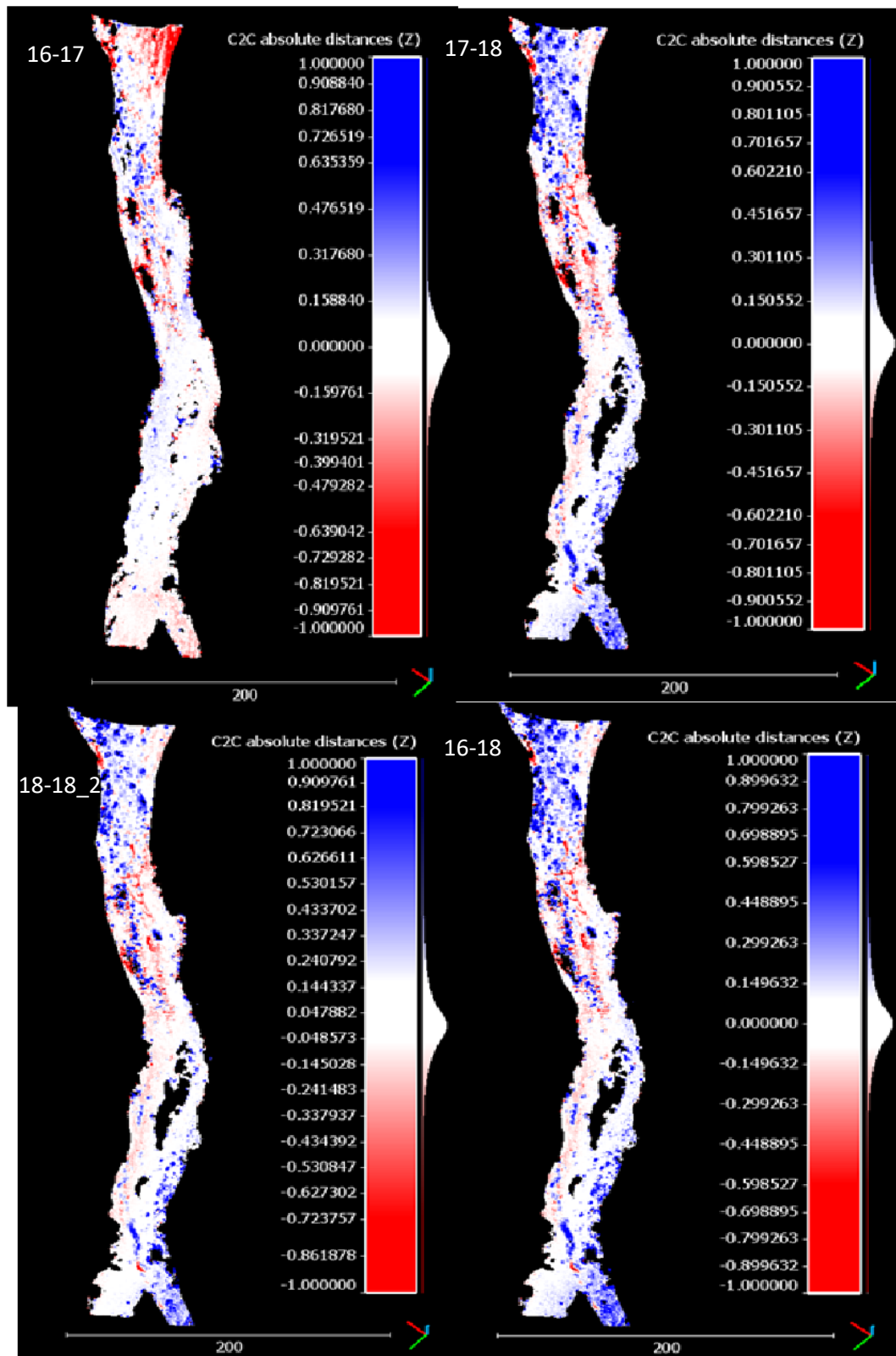


Figura. 60. Mapas de diferencias del canal obtenidos con el programa Cloudcompare, donde se presentan los diferentes saltos de tiempo, y en los que se observan las zonas de erosión y depósito.

En el mapa de diferencias correspondiente a 16-17, se puede observar una acumulación de bloques en la zona superior del canal, depositados en el año 2017 ya que no se encontraban en el año 2016. Cabe destacar, un ligero depósito de bloques en el subcanal de la izquierda, indicando por tanto que este es el canal activo en este transcurso de tiempo, ya que el subcanal derecho presenta valores invariantes.

Sin embargo, en el resto de mapas de diferencias se puede observar con claridad que hay depósito en el subcanal izquierdo, y erosión en el subcanal izquierdo.

La erosión en la zona central del canal es destacable en el período de tiempo de 2017 a 2018, obteniendo valores de erosión de hasta 0.70 metros.

Finalmente, en el mapa de diferencias en el que se compara el año 2016 con el de 2018, se observa generalmente un depósito en la zona inicial del canal, erosión en la zona central, y depósito en el subcanal derecho, es decir canal activo actualmente, y erosión en el subcanal izquierdo, es decir canal inactivo actualmente.

A continuación, se presenta el mapa de diferencias del cono de deyección (Figura. 61.) En el que de nuevo se puede observar de manera equivalente lo mismo a la Figura. 58.

De manera específica se puede observar depósito en los extremos del cono de deyección, tanto al inicio del mismo, como en el extremo final. Mientras en la zona central, se observa mayor erosión, al ser zona de paso de los bloques hacia el final del cono.

En el mapa de diferencias del año 2016-2017, apenas se observan cambios en ese transcurso de tiempo, básicamente se aprecia erosión en el subcanal derecho del cono de deyección. Mientras en el mapa de diferencias de 2017-2018, y junio de 2018-noviembre de 2018, se puede observar mayor variedad en los valores de erosión y depósito, aunque no llegan a valores de 0.25 metros en erosión ni en depósito.

Finalmente, en el mapa de diferencias en el que se comparan los años transcurridos, es decir de mayo de 2016 a junio de 2018, se pueden observar valores erosivos de hasta 0.60 metros, en el subcanal derecho, los cuales definen los arroyos por los que circula el flujo preferente. Mientras, en los extremos del mismo, tanto a inicio como a final, se obtiene un alto valor en depósito, de hasta 0.75 metros, indicativo de la nueva presencia de bloques que anteriormente, en 2016, no se encontraban.

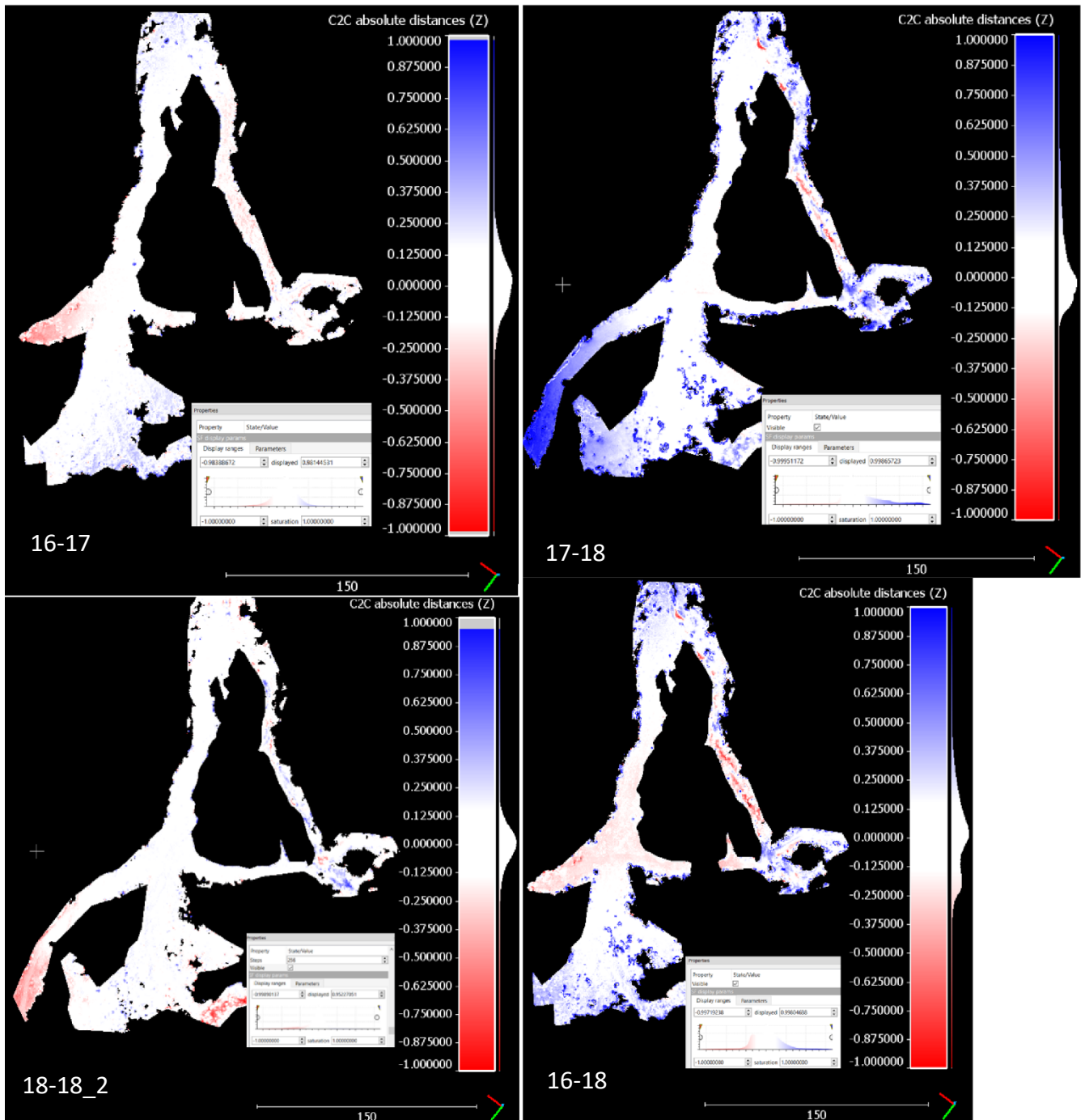


Figura. 61. Mapas de diferencias del cono de deyección obtenidos con el programa Cloudcompare, donde se presentan los diferentes saltos de tiempo, y en los que se observan las zonas de erosión y depósito.

Si se comparan los valores obtenidos tanto con el programa Cloudcompare, como con el programa Qgis, se consiguen valores prácticamente iguales. Cabe destacar, que conseguir el estudio de diferencias en el programa Cloudcompare resulta menos laborioso que con el programa Qgis, y resulta igual de efectivo y preciso.

5.4. Volumen total

Para terminar el estudio de este trabajo de fin de máster, se va a calcular el volumen total de material desprendido, y acumulado en el transcurso de las 4 ortofotos realizadas, es decir, de todo el transcurso de tiempo estudiado en este trabajo de fin de master.

Este volumen se va a conseguir con el programa Cloudcompare, y se va a calcular de cada una de las partes del barranco Rebaixader. Para obtener el valor del volumen preciso, las celdas vacías se van a dejar vacías, y el cálculo en cada celda se va a considerar a una altura media, y a una resolución d 0.5 cm/pixel.

Para que el análisis se considere aceptable es necesario obtener un porcentaje de celdas bien acopladas mayor al 80%, y un promedio de celdas analizadas cercano a un valor de 8.

Las imágenes obtenidas del volumen, y los datos aparecen reflejados en el anejo.13.

Por lo tanto, obtenemos lo siguiente:

- Para el área fuente (Figura. 62.), se dispone de una superficie de 94820 metros cúbicos, y a partir de ese valor se han desprendido 12100 metros cúbicos aproximadamente, y se han depositado 19100 metros cúbicos, obteniendo con ello, un volumen total en positivo, es decir más material depositado que erosionado de 7025 metros cúbicos. El resultado no resulta descabellado, y, por lo tanto, se considera aceptado, debido a la gran superficie que presenta. Cabe destacar, que el análisis realizado para la estimación del volumen ha sido exitoso ya que se ha obtenido un porcentaje de celdas bien acopladas del 93,3%, y un promedio de celdas de 7.9 de 8.

Volume: 7,024.659
Surface: 94,819.250

Added volume: (+)19,098.010
Removed volume: (-)12,073.351

Matching cells: 93.3%
Non-matching cells:
ground = 2.7%
ceil = 4.0%
Average neighbors per cell: 7.9 / 8.0

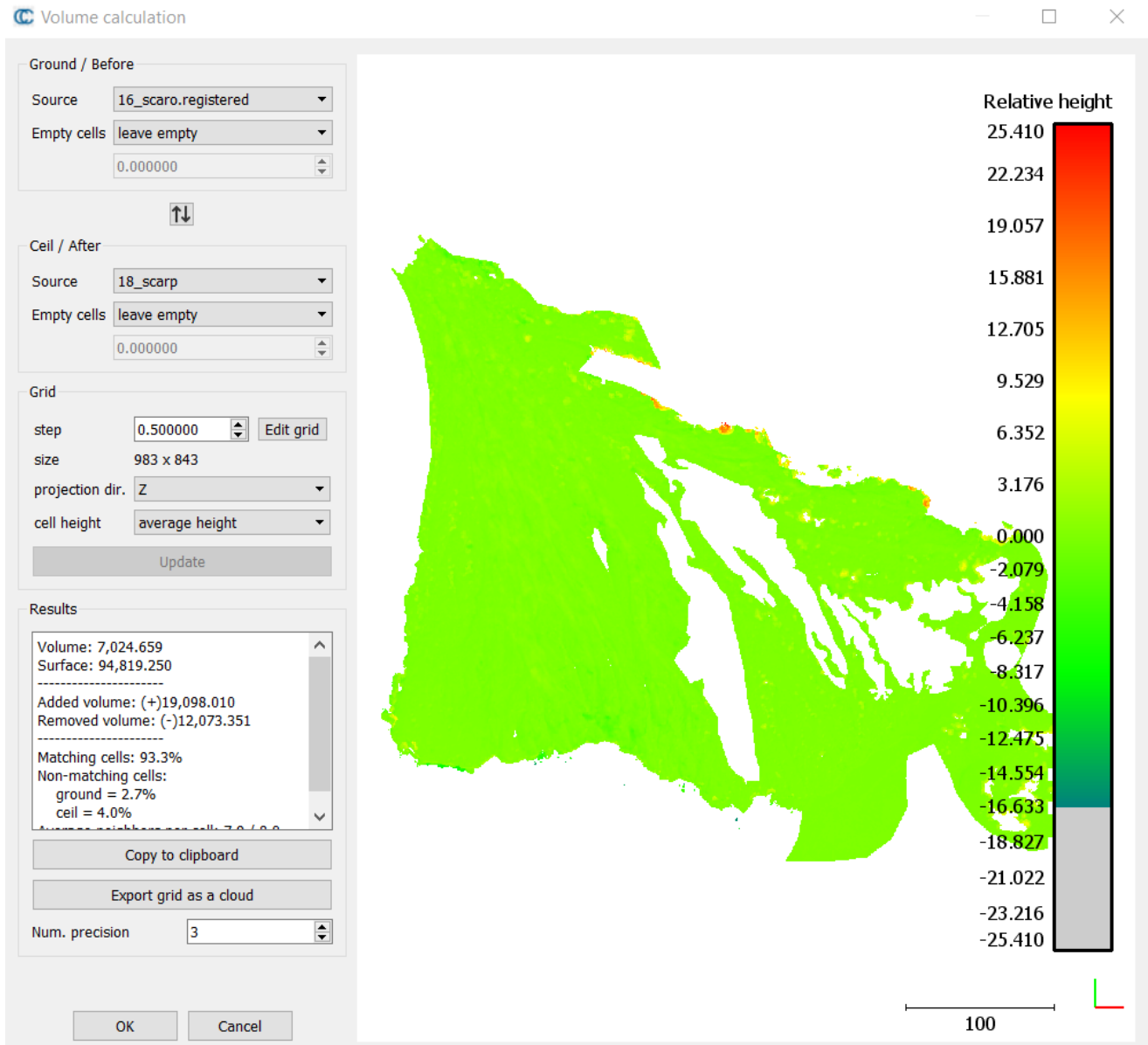


Figura. 62. Estimación del volumen total del área fuente en el transcurso de tiempo de 2016 a 2018.

- Para el canal (Figura. 63.), se dispone de una superficie de 14581 metros cúbicos, y a partir de ese valor se han desprendido 3577 metros cúbicos aproximadamente, y se han depositado 3884 metros cúbicos, obteniendo con ello, un volumen total en positivo, es decir más material depositado que erosionado de tan solo 308 metros cúbicos. El resultado obtenido es muy pequeño porque tanto el volumen erosionado como depositado ha sido prácticamente el mismo, dejando el canal prácticamente invariante. Este resultado, es completamente lógico teóricamente porque el canal, es zona de transporte de los bloques, por lo que la mayoría de bloques que pasan por el mismo, también desaparecen. Cabe destacar, que el análisis realizado para la estimación del

volumen ha sido exitoso ya que se ha obtenido un porcentaje de celdas bien acopladas del 85,3%, y un promedio de celdas de 7.8 de 8.

Volume: 307.099
Surface: 14,580.750

Added volume: (+)3,884.040
Removed volume: (-)3,576.941

Matching cells: 85.3%
Non-matching cells:
 ground = 10.7%
 ceil = 4.0%
Average neighbors per cell: 7.8 / 8.0

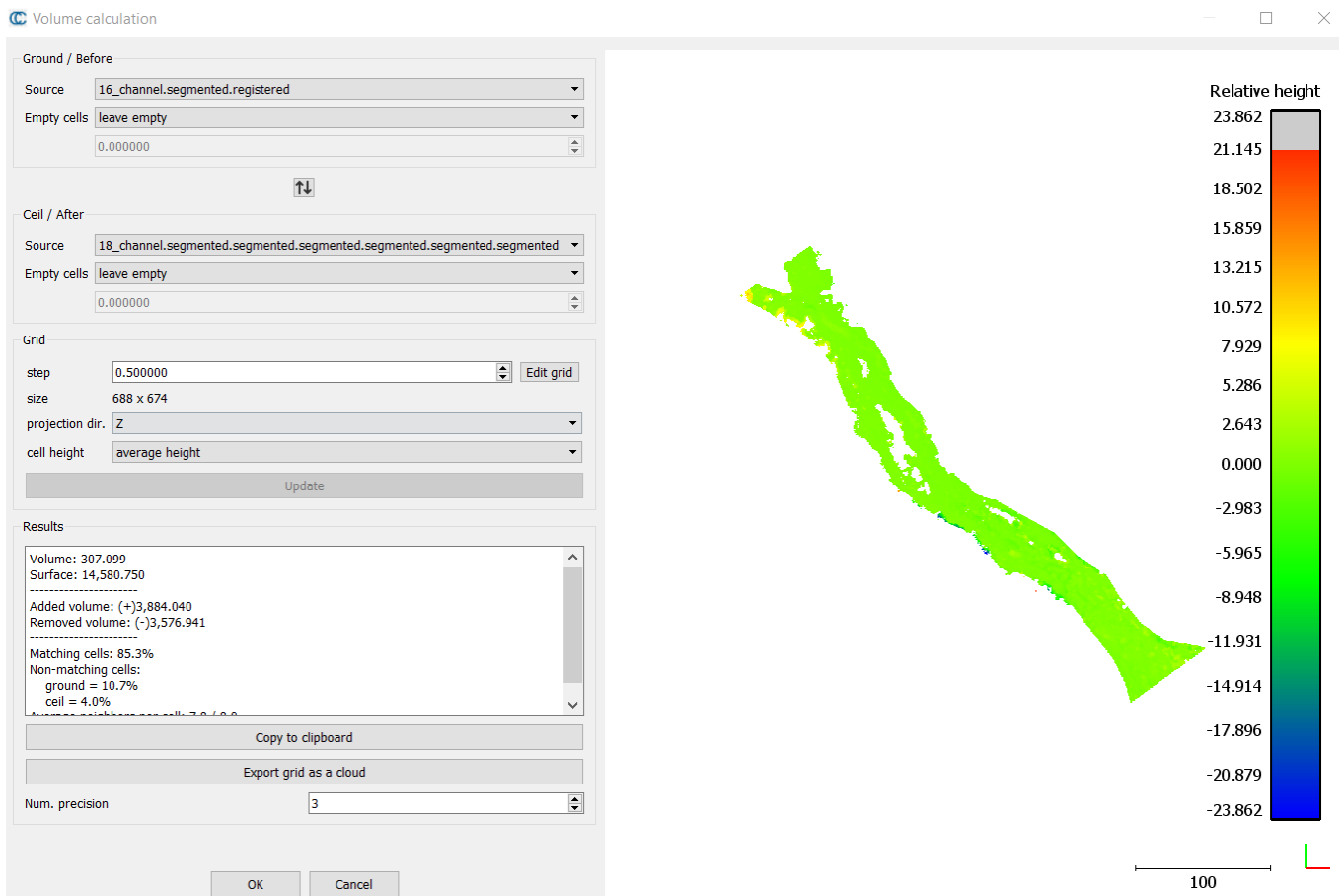


Figura. 63. Estimación del volumen total del canal en el transcurso de tiempo de 2016 a 2018.

- Para el cono de deyección (Figura. 64.), se dispone de una superficie de 14236.8 metros cúbicos, y a partir de ese valor se han desprendido 8767.8 metros cúbicos aproximadamente, y se han depositado únicamente 1214 metros cúbicos, obteniendo

con ello, un volumen total en negativo, es decir más material erosionado que depositado de 7554 metros cúbicos. El resultado obtenido es grande ya que se ha obtenido que el cono de deyección, que generalmente es deposicional, ha presentado un resultado erosivo en ese transcurso de tiempo. Cabe destacar, que el análisis realizado para la estimación del volumen no es muy fiable ya que se ha obtenido un porcentaje de celdas bien acopladas de tan solo 66.2%, y un promedio de celdas de 7.7 de 8. Este valor tan poco preciso, puede ser debido a una mala alineación del mismo.

<p>Volume: -7,553.848 Surface: 14,236.750 ----- Added volume: (+)1,213.942 Removed volume: (-)8,767.791 ----- Matching cells: 66.2% Non-matching cells: ground = 32.8% ceil = 1.0% Average neighbors per cell: 7.7 / 8.0</p>
--

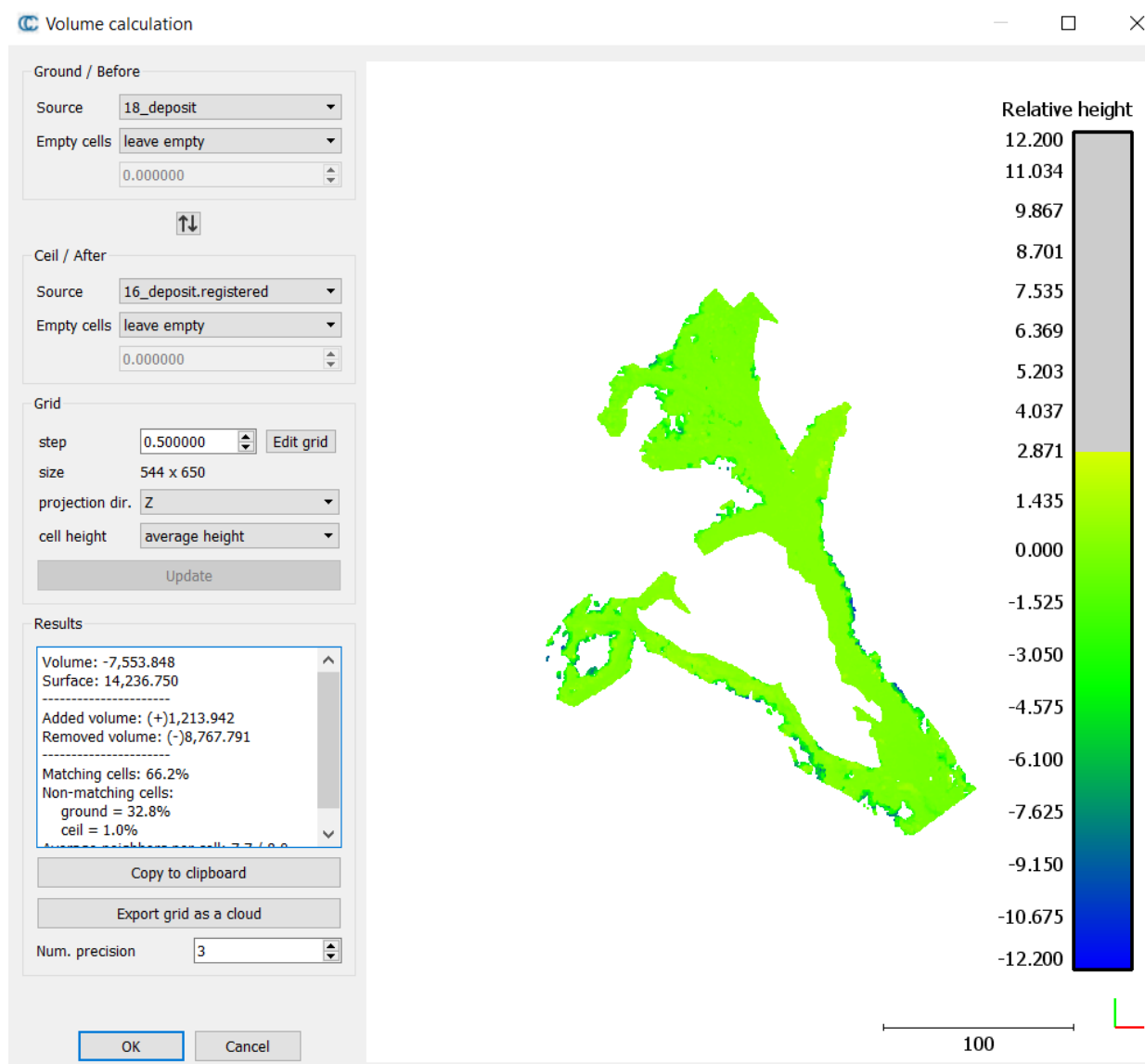


Figura. 64. Estimación del volumen total del cono de deyección en el transcurso de tiempo de 2016 a 2018.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo de fin de master, se han analizado en detalle varios aspectos, y procesos que el barranco de Rebaixader ha sufrido desde el año 2016 hasta la actualidad.

Este estudio se han realizado 4 campañas de dron, mediante el cual se han obtenido las nubes de puntos, para obtener las ortofotos disponibles, es decir la ortofoto de 2016, 2017, junio de 2018, y noviembre de 2018 con las que se ha trabajado en todo momento, y los DEMs. Estas ortofotos se han obtenido a partir del vuelo del dron, llegando a la conclusión de que el uso del mismo supone un enorme avance para el estudio de este tipo de procesos, en este caso, el del barranco de Rebaixader. A parte, es un instrumento fácil de utilizar, transportable, sin la necesidad de ser pilotado, económico con respecto a la realización de fotos aéreas, y efectivo, ya que nos permite trabajar en 3D sin la necesidad de correr el peligro de acceder in situ al lugar, expuesto a vulnerabilidad. Aunque lo importante de utilizar este instrumento no tripulado, es la calidad que se obtiene de la ortofoto, ya que con el dron se puede efectuar un vuelo de baja altitud suponiendo una resolución de la imagen entre 5 y 10 veces mejor que la realizada con las fotografías aéreas.

Con respecto al estudio del propio barranco, se ha obtenido que cuando el volumen de bloques desprendido ha sido mayor, los eventos de precipitaciones torrenciales también han sido mayores, considerando, por tanto, el agua, un factor importante a considerar en este estudio. Es importante destacar la ausencia de bloques grandes en el cono de deyección, debido a que estos han sido fragmentados durante su trayectoria desde el área fuente.

Intentar seguir la trayectoria de los bloques con el transcurso de los años, es un proceso prácticamente inviable ya que los bloques presentes en un año, pueden haber sido cubiertos al siguiente año por depósito, o simplemente fracturados al caer desde pendientes tan fuertes.

La gráfica de dispersión general en la que se representa la longitud máxima de cada uno de los bloques vs. cantidad de bloques para cada año, se presenta como una curva granulométrica en la que se confirma que, si el bloque es grande la energía que requiere de desplazamiento será mayor que la de un bloque pequeño. Los gráficos de dispersión presentes, reflejan una línea de tendencia continua indicando que, cuanto más pequeños sean los bloques, más fáciles serán de mover y por lo tanto, la cantidad de bloques desprendidos será mayor.

A partir del uso de los softwares utilizados, el programa por excelencia para ejecutar la mayor parte del trabajo realizado ha sido el programa Qgis, aunque para obtener los mapas de diferencias resulta menos laborioso y más rápido el programa CloudCompare. Con el software

Cloud compare se han obtenido las alineaciones, y los modelos digitales de elevación (DEMs), completamente necesarios para ejecutar la mayoría de los procesos en el programa de Qgis.

Las alineaciones que se han llevado a cabo con el programa CloudCompare tienen un papel fundamental, ya que ejercen todo el protagonismo para que el trabajo llevado a cabo posteriormente sea preciso y fiable en todo este trabajo. Es necesaria una buena alineación, para que el trabajo sea correcto.

En cuanto a los mapas de diferencias obtenidos, tanto con el programa Qgis, como con el programa CloudCompare, se obtiene un área fuente erosivo en la zona superior y central, y un área fuente deposicional en la zona inferior, el cual conecta con el inicio del canal. Mientras, en el canal la diferencia destacable es el canal activo por el cual los bloques siguen su trayectoria. Estos mapas confirman que en el mapa correspondiente a 16-17 el canal activo es el subcanal izquierdo, diferente al del resto de años, ya que a partir del mapa de diferencias obtenido a partir del 17-18 el canal activo corresponde al subcanal derecho. Finalmente, en el cono de deyección, el mapa de diferencias obtenido se presenta deposicional en la entrada del mismo y en el final, mientras que en la zona central se obtienen valores erosivos.

Los volúmenes totales obtenidos tanto en el área fuente, como en el canal, son valores positivos, es decir, material depositado. Mayoritariamente, este volumen depositado en el área fuente suele presentarse acumulado en el pie del área fuente, es decir, donde se estrecha para dar inicio al canal. Los valores de volumen obtenidos en el canal, son bajos porque el canal, es zona de transporte de los bloques, por lo que la mayoría de bloques que pasan por el mismo, también desaparecen. Sin embargo, el cono de deyección presenta valores negativos, es decir, material erosionado, ya que los sub-canales que presenta son zonas de transporte de los bloques, siguiendo su trayectoria hacia el pie del cono de deyección, donde se presenta la mayor acumulación de los mismos.

Finalmente, de cara a líneas de investigación futuras se proponen diversas aportaciones, importantes y necesarias, para el estudio del barranco las cuales son las siguientes:

- Ampliar el estudio en lo que respecta al análisis de bloques, incorporando el programa Rockfall de rocscience. Mediante este programa, a partir de el volumen, y densidad del material presente en el barranco, se podría estimar según el tamaño de los bloques, la distancia que pueden alcanzar los distintos tamaños de bloques del barranco y, por tanto, obtener la trayectoria de los mismos en el transcurso de los años ya que foto-interpretativamente es algo prácticamente inviable.

- Comparar, el volumen determinado obtenido a partir de los datos adquiridos con el vuelo de dron, con el volumen auscultado a partir de los sensores del barranco.
- Intensificar el análisis de erosión vs. lluvia, ya que en este trabajo de fin de máster únicamente se han comparado los valores totales de precipitación de una ortofoto a otra, con los eventos ocurridos desde 2016, y el volumen de bloques desprendidos, obteniendo únicamente como conclusión que las precipitaciones son un factor fundamental en el barranco.
- Aplicar un modelo de erosión, y hacer una comparativa con los datos de dron obtenidos.
- Seguir volando cada año, lo ideal en época de verano, para conseguir una serie más larga, con más ortofotos de alta resolución, y analizar la evolución del barranco con el transcurso de los años.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Abanco Martínez de Arenzana, C., y Hurlimann Ziegler, M. (2013). Estimación de la erosión producida por las corrientes de derrubios mediante técnicas de minería de datos con datos de campo y topográficos. In VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables (pp. 254-265). Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE).
- Abancó, C., y Hürlimann, M. (2012). Auscultación de corrientes de derrubios en el barranco el rebaixader, pirineo central. Primeras experiencias para un sistema de alerta temprana y alarma. Avances de la Geomorfología en España, 2012-2012, 57.
- Addati, G. A., y Pérez Lance, G. (2014). Introducción a los UAV's, Drones o VANTs de uso civil (No. 551). Serie Documentos de Trabajo.
- Alcaldía de Medellín- Colombia. Movimientos en masa. Disponible en internet (Consulta 03/19):
https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pccdesign/SubportaldelCiudadano_2/PlandeDesarrollo_0_8/Publicaciones/Shared%20Content/Documentos/2016/CartillaMovMasa.pdf
- Alcántara, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. Investigaciones geográficas, (41): 7-25.
- Boelhouwers, J., Holness, S., y Sumner, P. (2000). Características geomorfológicas de flujos de escombros pequeños en Kop de Junior, Isla Marion, subantártica marítima. Procesos de superficie terrestre y formas terrestres: The Journal of the British Geomorphological Research Group, 25 (4), 341-352.
- Bolaño, F. (2008): Anàlisi d'inestabilitats en dipòsits glacials als barrancs de la Baixada i l'Esbornada de Senet (Alta Ribagorça, Pirineu central). Pàgs: 2-8.
- Cambray, D. y Esglesias, J. (1991) Cartografía geomorfológica. GEOMAT s.c.p.
<http://info.igme.es/cartografiadigital/sidimagenes/magna/20180/Informe%20de%20cartograf%C3%ADa%20geomorfol%C3%B3gica/Informe%20de%20cartograf%C3%ADa%20geomorfol%C3%B3gica.pdf>
- Castillo, E. L. A. L. (2015). Monitoreo de deslizamientos utilizando el sistema de extensómetros artesanales.
- Copons Ilorens, R. y Tallada Masquef, A. (2009). Movimientos de ladera.
- Coussot, P., y Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*, 40(3-4), 209-227.

- García-Ruiz, J. M., Chueca, J., y Julián, A. (2004). Los movimientos en masa del Alto Gállego. *Geografía Física de Aragón. Aspectos generales y temáticos*, 141-152.
- Girardeau-Montaut, D. (2017). *CloudCompare version 2.6. 1 user manual*.
- Heras Mateo, P. (2016). Análisis de la distribución temporal de lluvias umbral y de su capacidad predictiva de flujos torrenciales. Aplicación en el barranco del Rebaixader (Lleida, Pirineos) (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Hürlimann, M., Abancó, C., Moya, J., & Vilajosana, I. (2014). Results and experiences gathered at the Rebaixader debris-flow monitoring site, Central Pyrenees, Spain. *Landslides*, 11(6), 939-953.
- Hürlimann, M., C. Abanco, and J. Moya (2011) Experiences of debris-flow monitoring and warning at catchment scale in the Pyrenees, Second World Landslide Forum. Rome, 153-159.
- James, M. R., Robson, S., y Smith, M. W. (2017). 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(12), 1769-1788.
- Lancelotti, J. (2015). Curso de posgrado: Sistemas de Información Geográfica (SIG) aplicados a la ecología. Facultad de ciencias naturales UNPSJB.
- Madrid Vergara, I. V. (2012). Monitoreo de la humedad y de las presiones intersticiales en un depósito de origen glaciar y su efecto en la formación de roturas superficiales. Aplicación en un till en Senet, Alta Ribagorça.
- Mampaso Torremocha, M. (2016). El riesgo de los movimientos de ladera en la planificación del territorio: Estudios de caso en Toscana (Italia).
- Molina García, A. M. (2016). Aplicación de la fotogrametría digital para la representación tridimensional del Acueducto de Puça en Petrer (Alicante).
- PhotoScan, A. (2013). *Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition, Version 1.0*. O. St. Petersburg: Agisoft LLC.
- Ruiz Carulla, R., Corominas Dulcet, J., y Hurlimann Ziegler, M. (2017). Experiencias con drones para el estudio de movimientos de ladera. In IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables (pp. 581-592). International Centre for Numerical Methods in Engineering (CIMNE).
- Vallés González, G. (2017). El uso de dron para la cartografía y el análisis geomorfológico de procesos torrenciales. Experiencias de la cuenca el Rebaixader (Pirineo Central) (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

- Vilaplana, J. M. (1983). Quaternary Glacial Geology of the Alta Ribagorça Basin (Central Southern Pyrenees). Acta geológica hispánica, 18(3), 217-233.

Enlaces consultados:

- Planificación del vuelo de dron: <http://www.aerial-insights.co/blog/como-planificar-capturas-de-dron/> última consulta abril 2019.
- Mapa geológico correspondiente a la zona de estudio de este trabajo de fin de máster: http://info.igme.es/cartografiadigital/datos/magna50/jpgs/d1_G50/Editado_MAGNA50_180.jpg última consulta febrero 2019.
- Guía Agisoft PhtoScan: <https://www.agisoft.es/products/agisoft-photoscan/> última consulta abril 2019.
- Manual de CloudCompare: <http://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf> ultima consulta Abril 2019.
- Mapa topográfico del área de estudio: <http://www.icc.cat/appdownloads/?c=fmetopo5m> última consulta enero 2019.
- <http://www.icgc.cat/es/Ciudadano/Descarga/Mapas-topograficos>
- Descripción modelo de elevación digital (DEM): <http://www.beta.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/relieve/continental/metadata/mde.pdf> (instituto nacional de estadística y geografía), última consulta Enero 2019.

Anejos

Anejo 1. Cartografías de la zona de estudio.

Cartografías individuales

2016



Leyenda

2016

areafuente2016

canal2016

conodedeyección

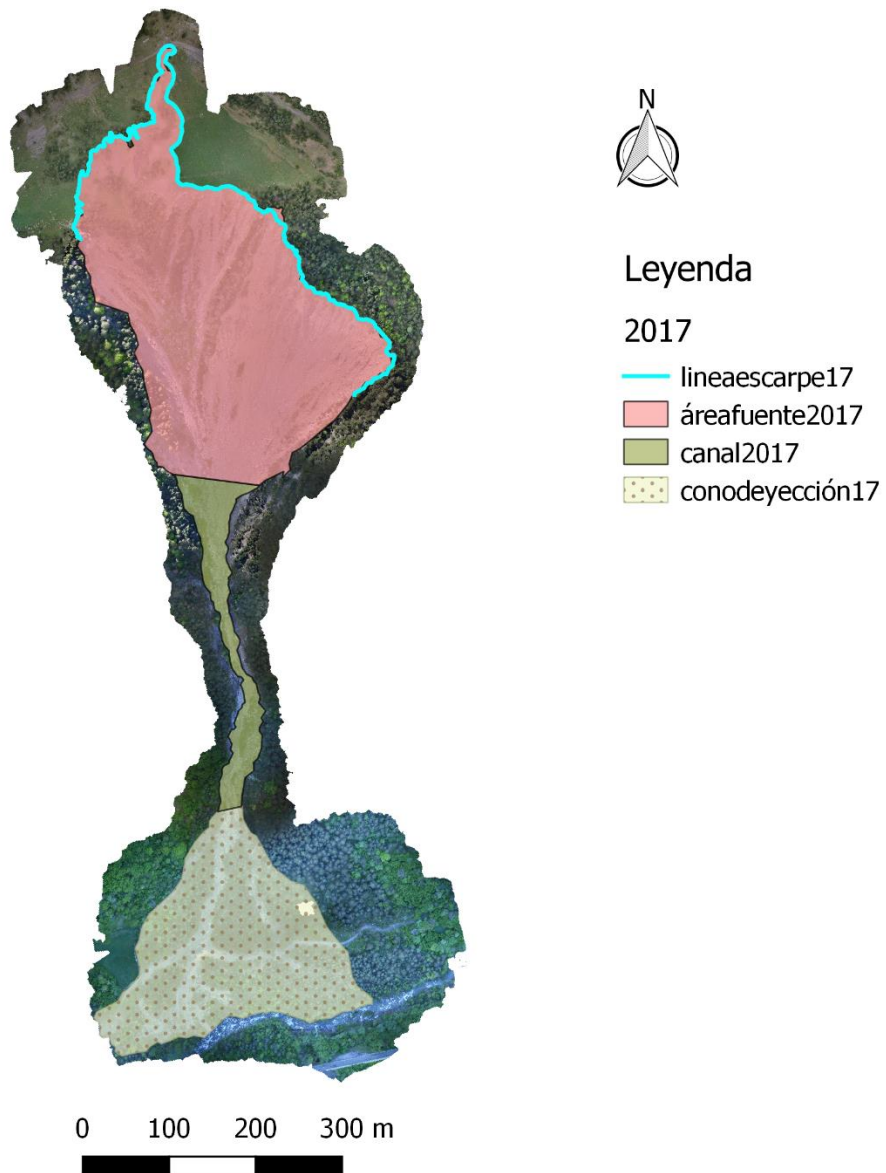
lineaescarpe16

201606_orto_5cm

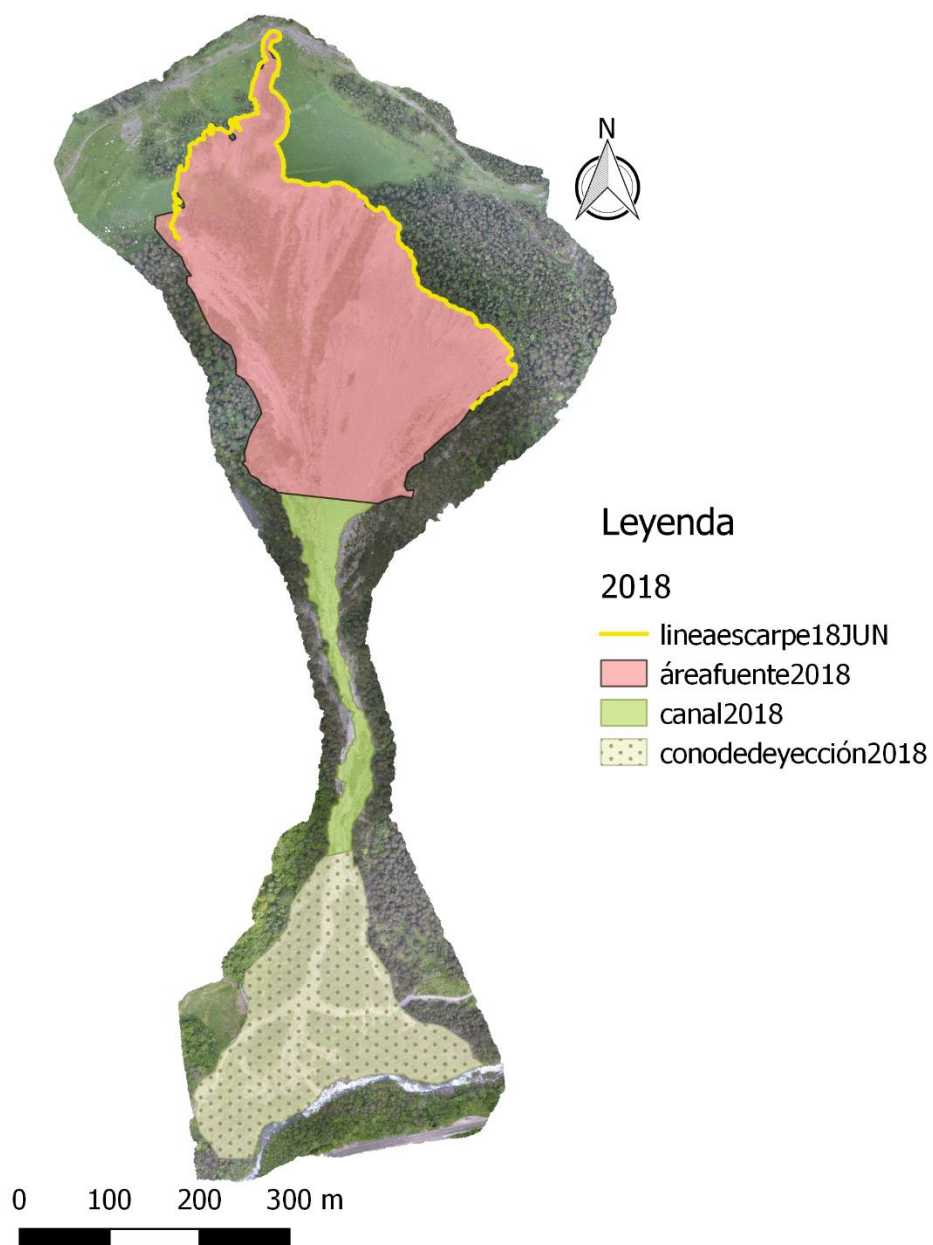
0 100 200 300 m

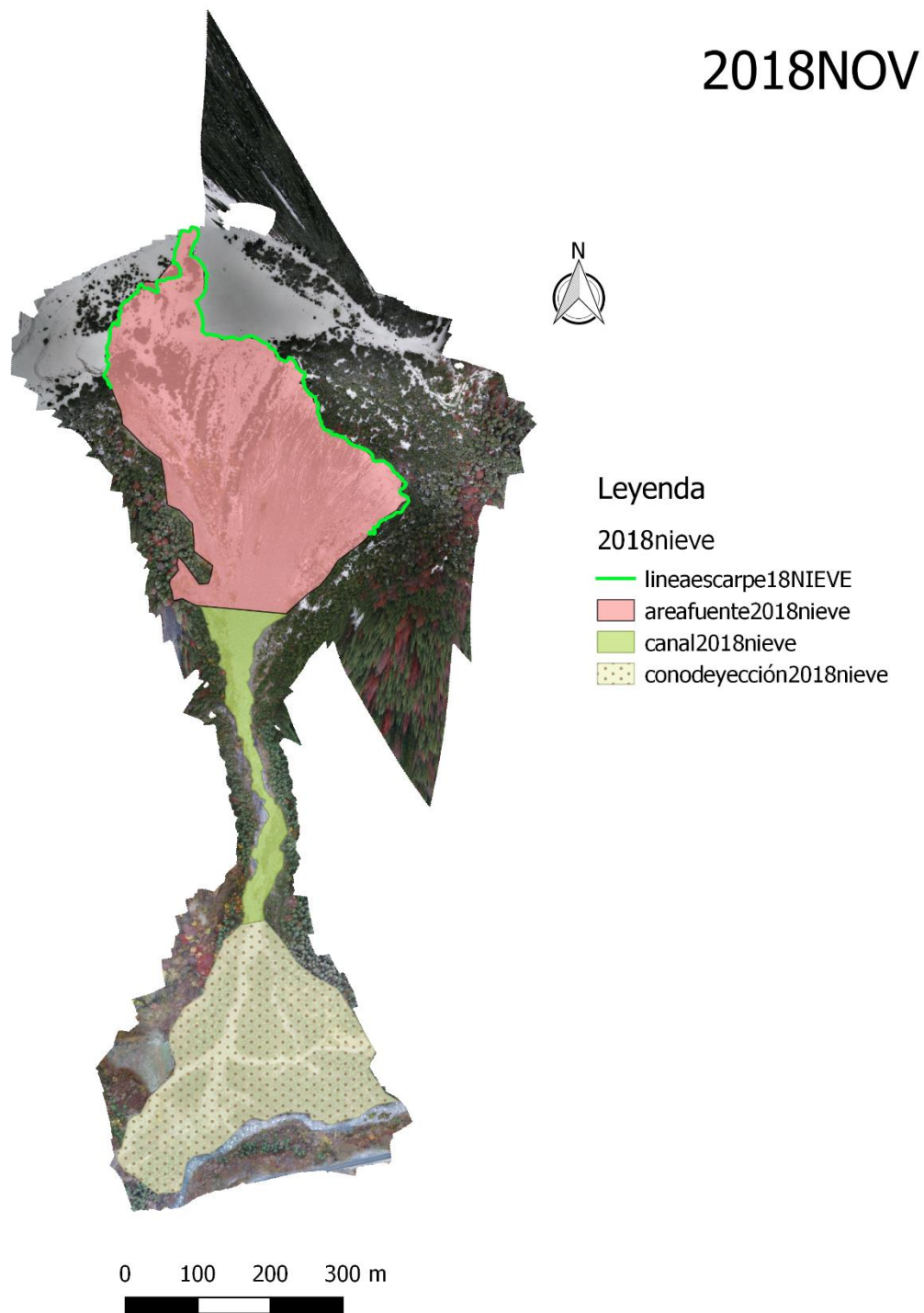


2017

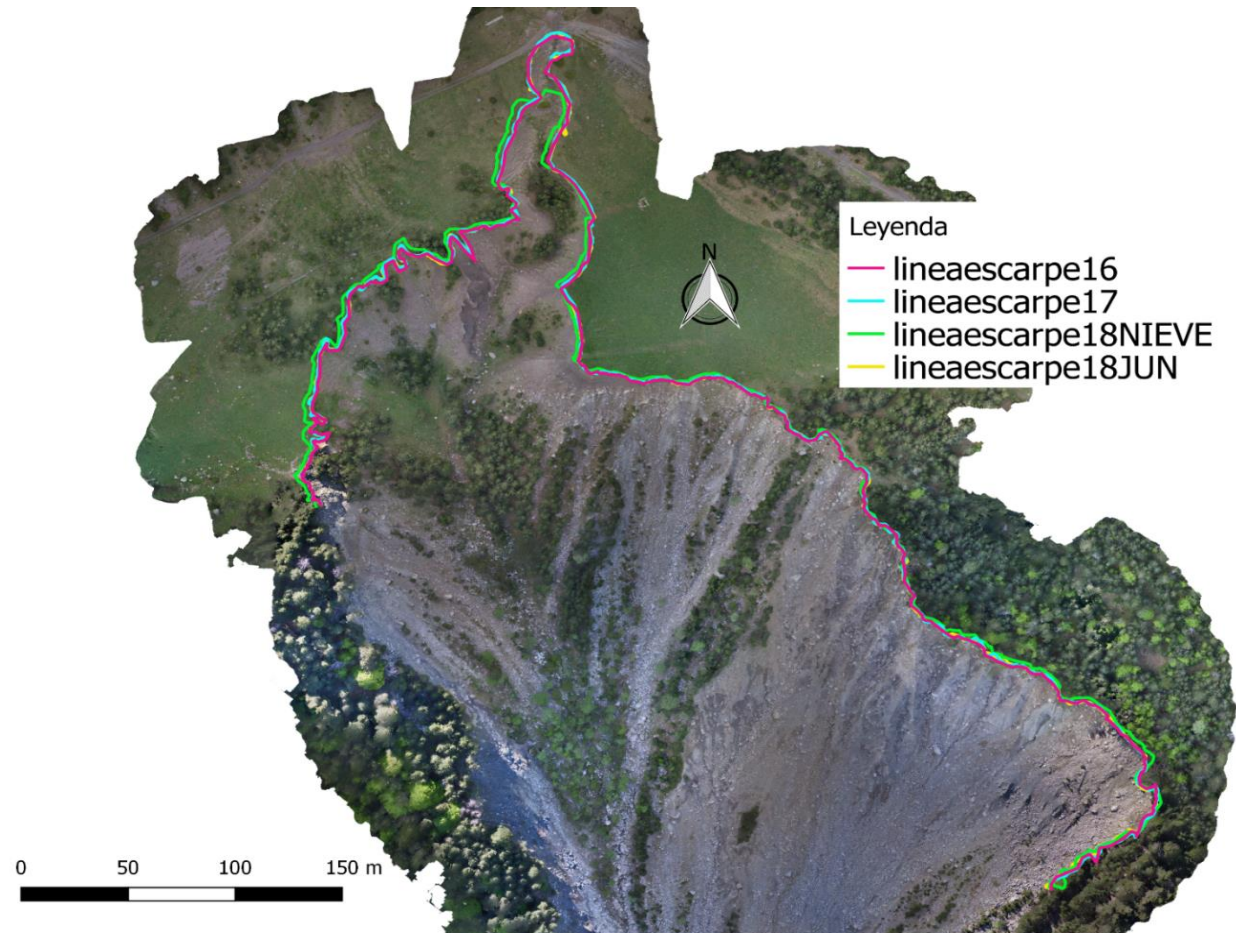


2018JUN



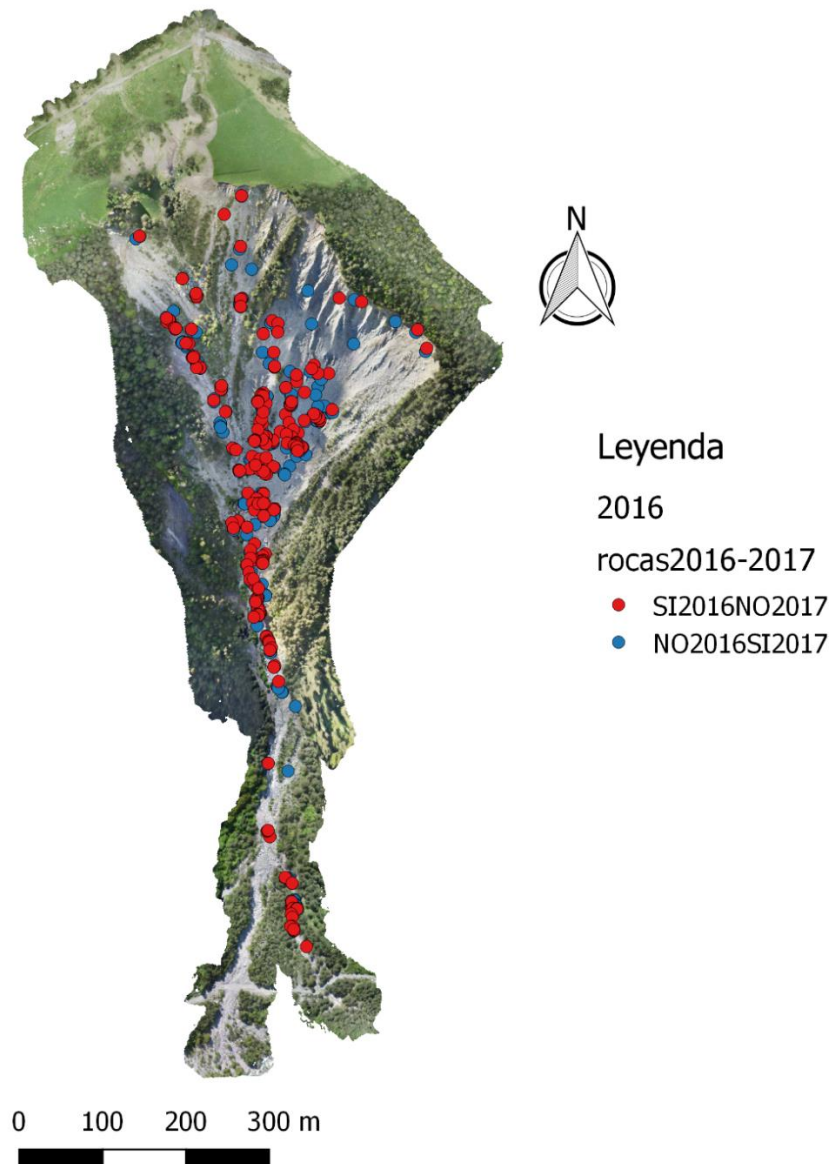


Cartografía de la evolución de la línea de escarpe

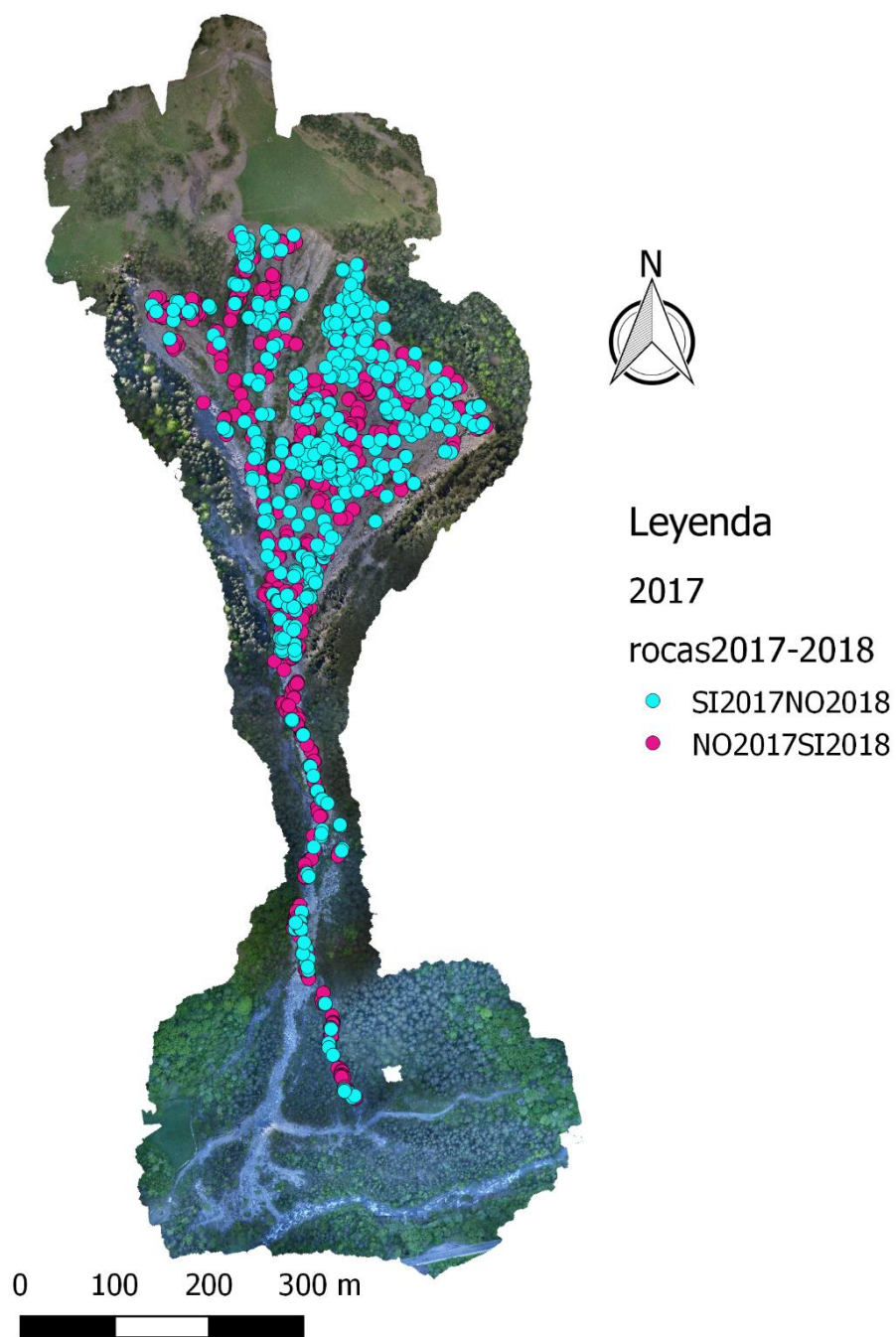


Recuento de bloques presentes en un año, y no en otro, y viceversa

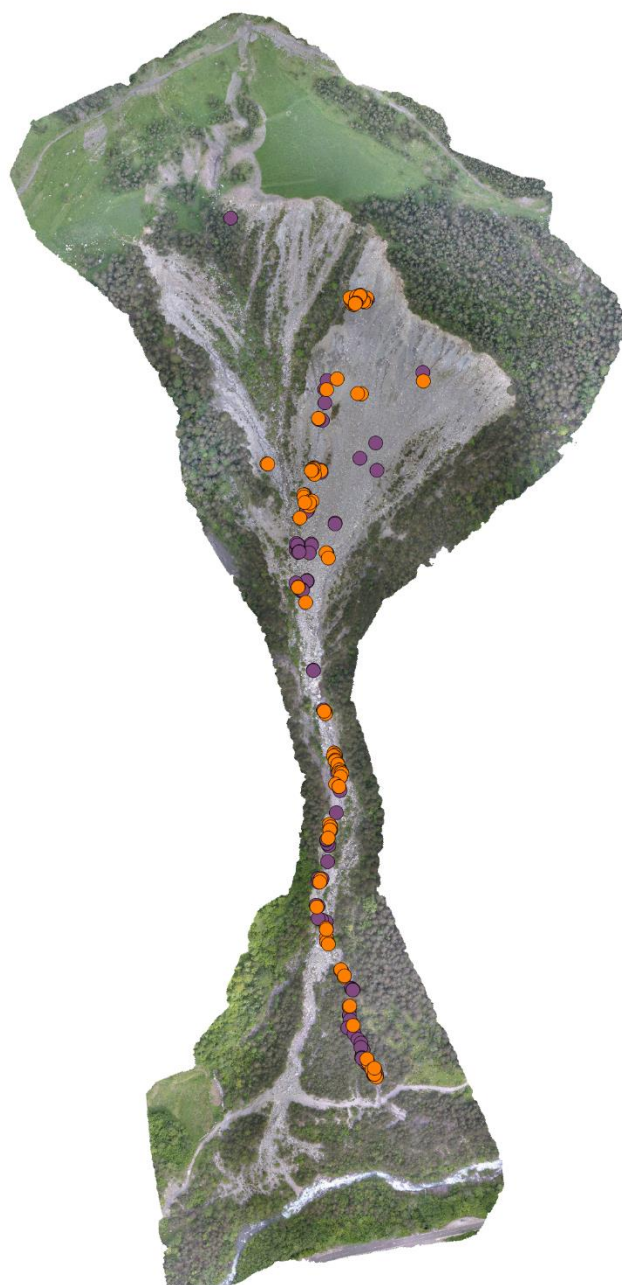
2016-2017



2017-2018JUN



2018JUN-2018NOV



Leyenda

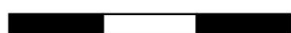
2018

rocas2018-2018nieve

● NO2018SI2018NIEVE

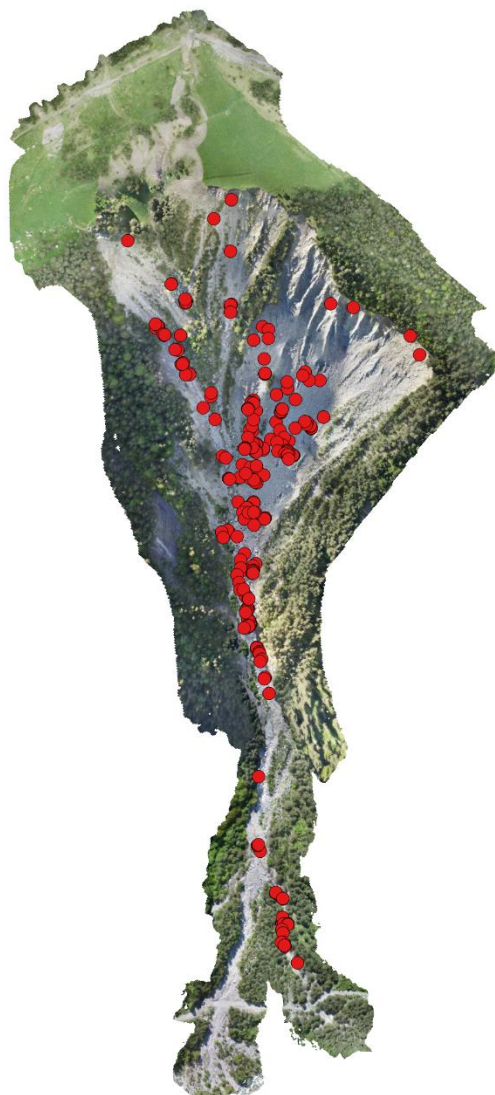
● SI2018NO2018NIEVE

0 100 200 300 m



Conjunto de bloques presentes en cada año.

2016



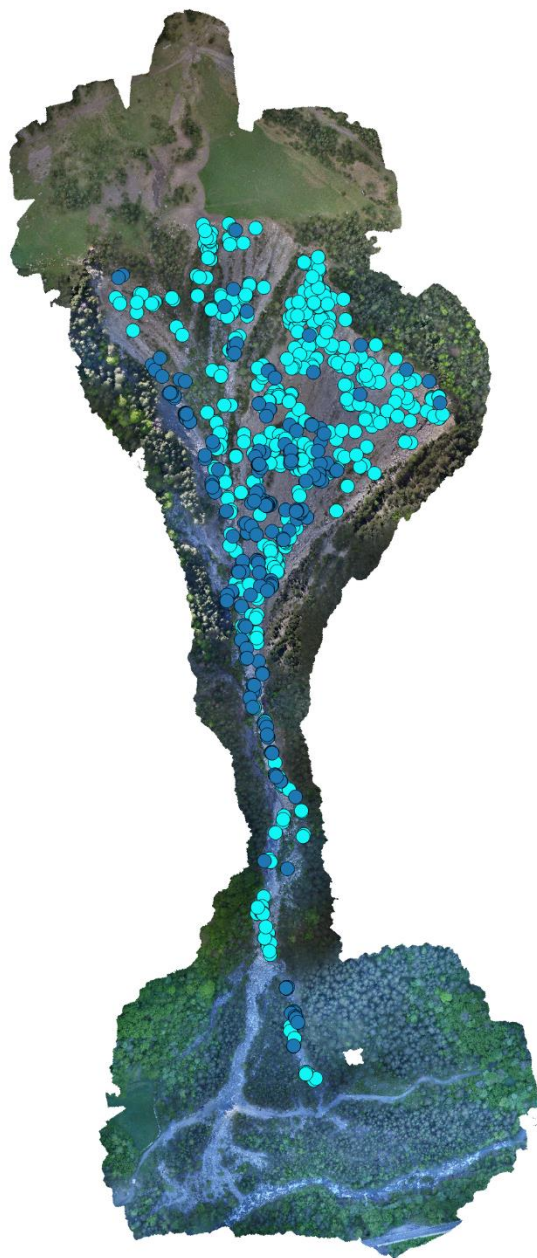
Leyenda

• Rocas 2016

0 100 200 300 m

A horizontal scale bar with alternating black and white segments. The segments are labeled with the numbers 0, 100, 200, and 300, followed by the unit 'm' for meters.

2017



Leyenda

- Rocas 2017
- Rocas 2017

0 100 200 300 m

A horizontal scale bar with a black and white alternating pattern, used to indicate distance in meters.

2018JUN



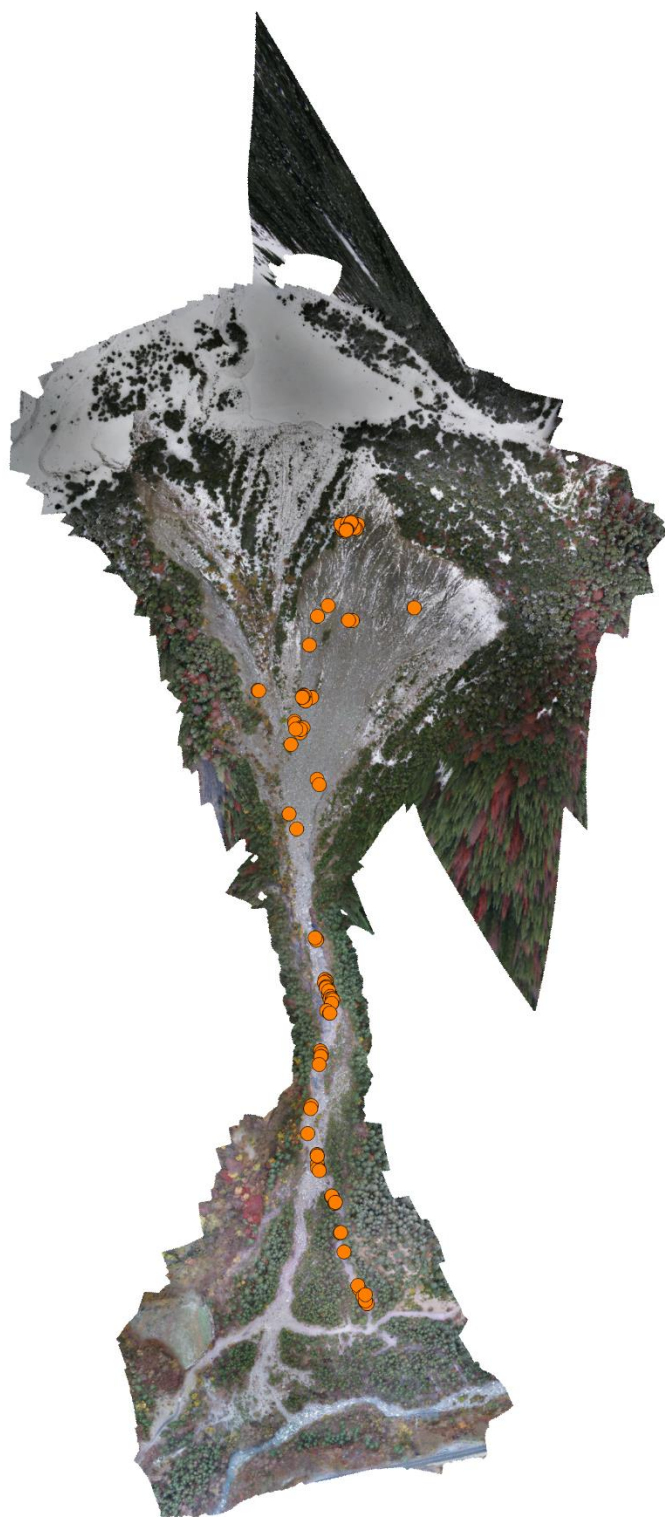
Leyenda

- Rocas 2018JUN
- Rocas2018JUN

0 100 200 300 m



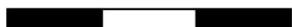
2018NOV



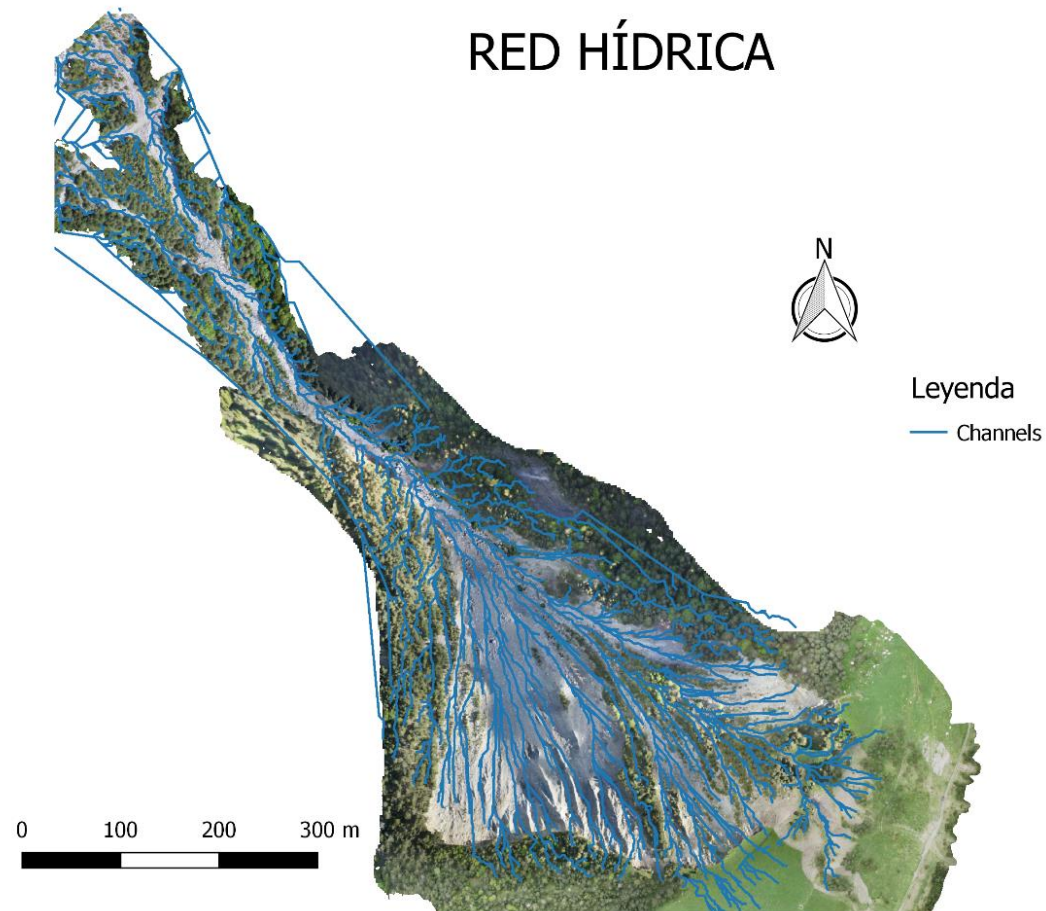
Leyenda

- Rocas 2018NOV

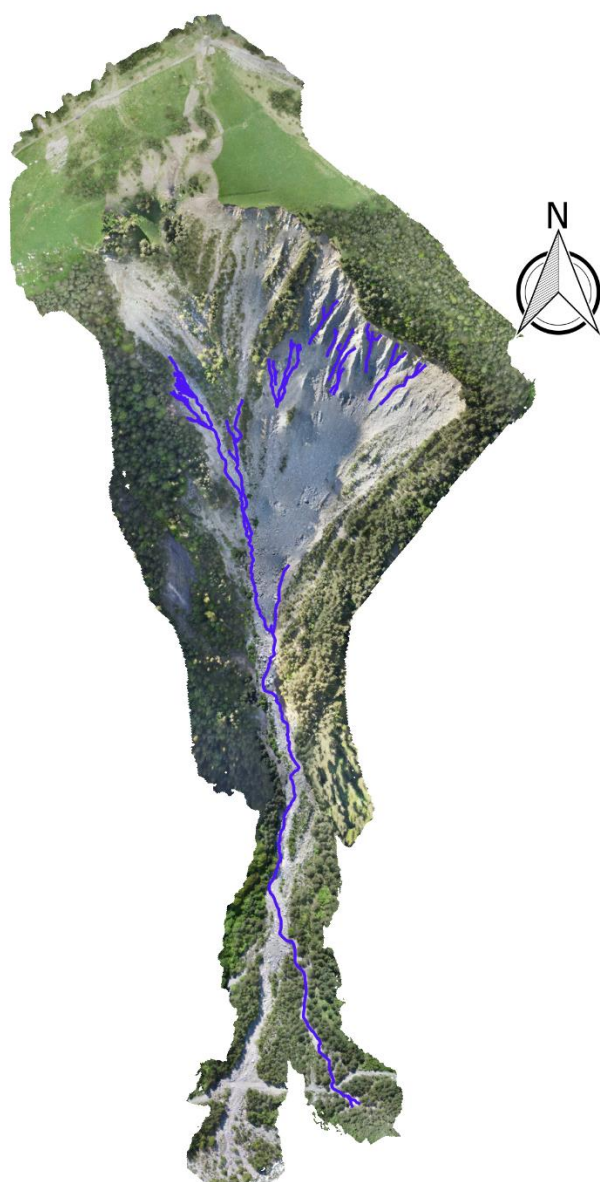
0 100 200 300 m



Red hídrica general.



2016



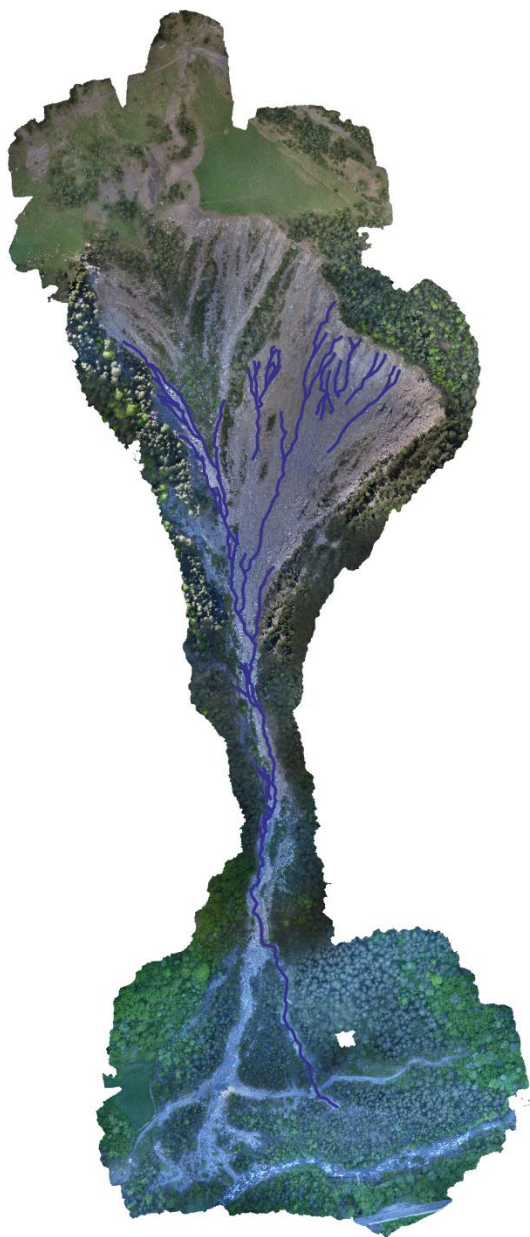
Leyenda

2016

— FLUJO PREFERENTE 16

0 100 200 300 m

2017

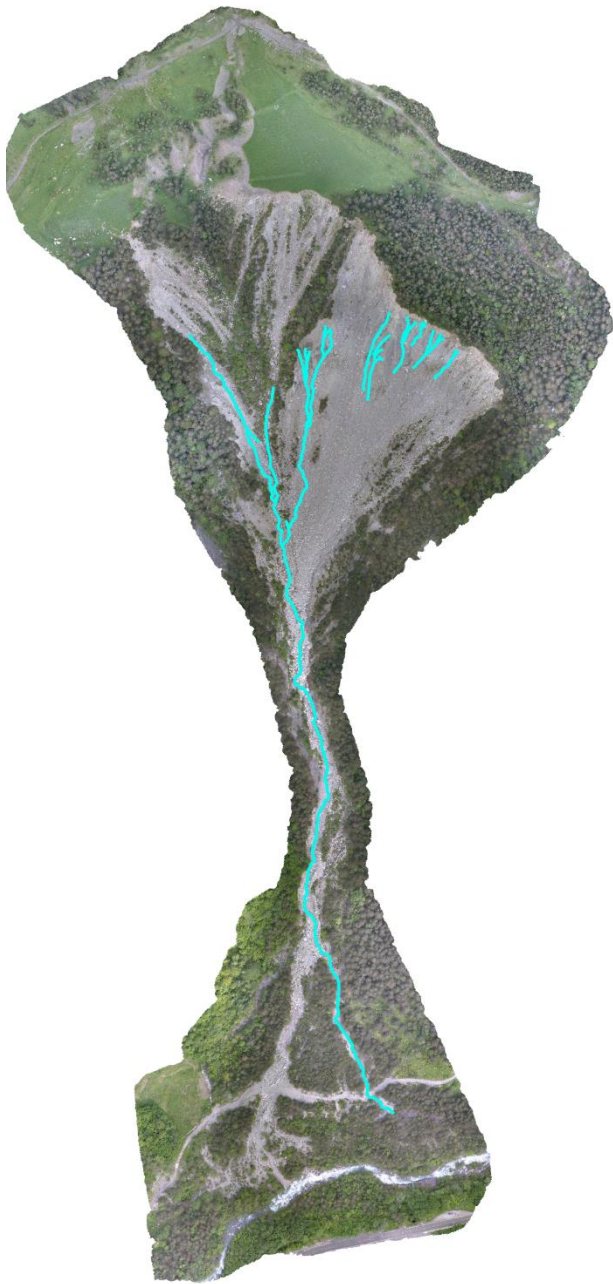


Leyenda

— FLUJO PREFERENTE 17

0 100 200 300 m

2018JUN



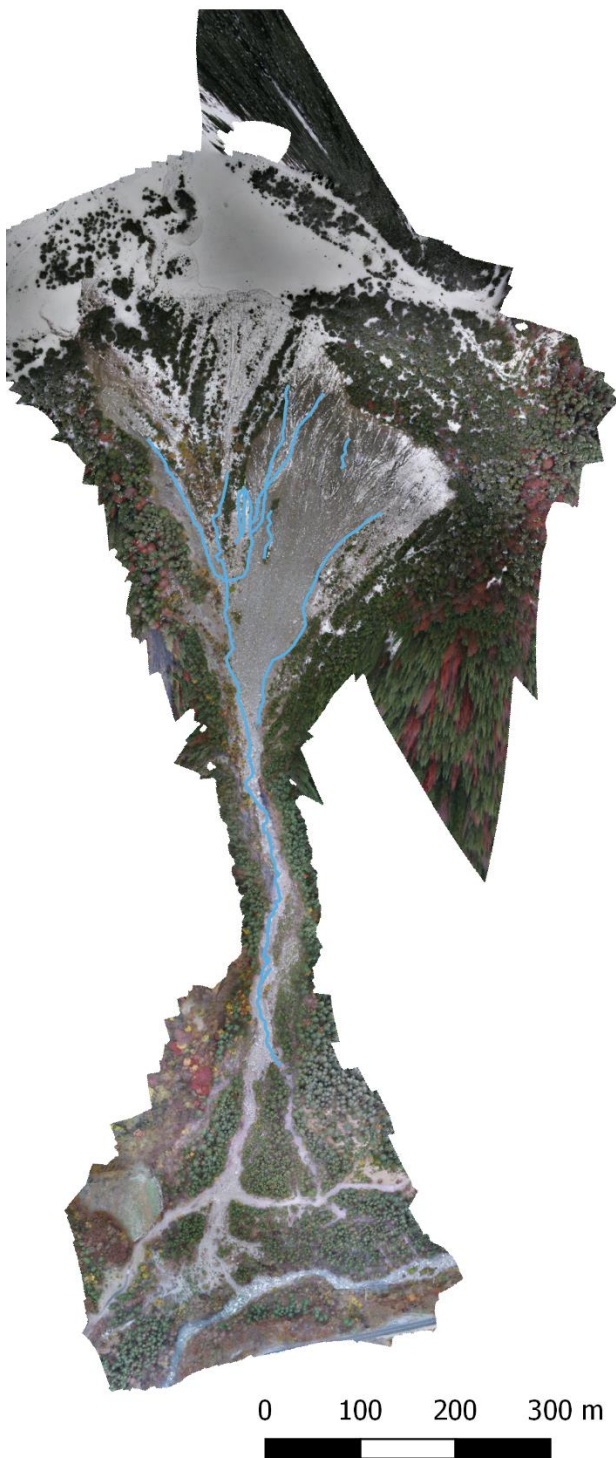
Leyenda

— flujopreferente18

0 100 200 300 m

A scale bar with alternating black and white segments, corresponding to the 0, 100, 200, and 300 m markings.

2018NOV

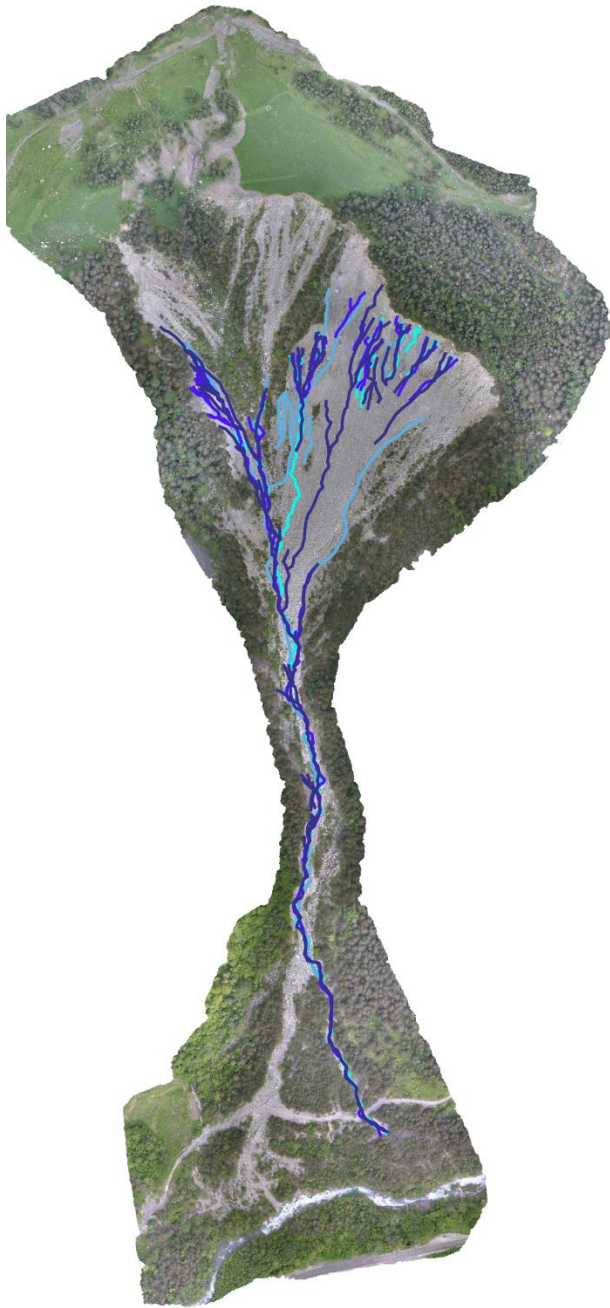


Leyenda

— flujopreferente18_2

Flujo preferente de los cuatro años

2016-2017-2018JUN-2018NOV



Leyenda

- FLUJO PREFERENTE 16
- FLUJO PREFERENTE 17
- FLUJO PREFERENTE 18JUN
- FLUJO PREFERENTE 18NOV

0 100 200 300 m

A horizontal scale bar with alternating black and white segments, corresponding to the 0, 100, 200, and 300 m markings.

Anejo 2. Tabla bloques de rocas 2016, 2017,2018jun,2018nov junto con las longitudes de cada bloque.

2016			
número de bloques	Bloques grandes, ≥ 2 metros	Bloques medianos, > 1 metro y < 2 metros	Bloques pequeños ≤ 1 metro
1	2.49		
2		1.82	
3		1.11	
4	3.85		
5		1.26	
6			0.90
7			0.95
8			0.81
9		1.51	
10		1.23	
11			0.97
12			0.60
13		1.04	
14			0.76
15			0.98
16		1.16	
17			0.67
18		1.15	
19		1.80	
20			0.91
21			0.80
22			0.86
23		1.10	
24		1.11	
25		1.53	
26		1.39	
27	2.47		
28	2.24		
29		1.23	
30			0.96
31		1.28	
32		1.55	
33		1.28	
34		1.04	
35			0.88
36			0.62
37			0.83
38			0.92
39		1.88	
40		1.58	
41		1.68	
42	2.25		
43		1.95	
44	2.06		

45	3.58		
46		1.45	
47		1.59	
48		1.28	
49		1.20	
50		1.16	
51		1.91	
52		1.43	
53		1.77	
54		1.75	
55		1.42	
56		1.11	
57	2.42		
58		1.16	
59			0.81
60		1.15	
61		1.10	
62			0.84
63		1.55	
64		1.17	
65	2.19		
66		1.06	
67			0.63
68		1.38	
69			0.84
70			0.68
71			0.46
72			0.42
73			0.39
74		1.23	
75			0.68
76		1.45	
77	2.19		
78		1.36	
79			0.69
80			0.37
81			0.30
82		1.21	
83			0.94
84		1.04	
85			0.76
86			0.42
87			0.55
88			0.54
89		1.94	
90			0.81
91			0.85
92			0.87
93		1.30	
94		1.17	
95			0.58
96		1.16	
97		1.10	
98			0.67

99			0.96
100			0.54
101		1.24	
102		1.33	
103		1.57	
104		1.19	
105			0.58
106			0.34
107		1.32	
108		1.52	
109			0.81
110		1.18	
111		1.22	
112			0.98
113		1.28	
114			0.58
115			0.56
116			0.61
117			0.47
118			0.75
119		1.67	
120		1.16	
121			0.76
122		1.36	
123		1.31	
124			0.95
125			0.74
126			0.78
127			0.89
128			0.77
129			0.80
130			0.76
131			0.46
132			0.89
133		1.06	
134			0.91
135			0.62
136			0.81
137	2.86		
138		1.78	
139		1.48	
140		1.37	
141		1.91	
142		1.92	
143		1.75	
144		1.35	
145		1.15	
146			0.82
147		1.24	
148	2.00		
149			0.90
150			0.92
151		1.38	
152		1.81	
153		1.04	

154			1.00
155			0.90
156			0.81
157		1.32	
158			0.88
159	2.13		
160		1.56	
161			0.99
162			0.93
163		1.19	
164			0.80
165		1.50	
166		1.45	
167			0.94
168		1.29	
169			0.86
170		1.20	
171			0.95
172	2.70		
173		1.88	
174	2.58		
175			0.75
176		1.08	
177		1.23	
178		1.68	
179		1.49	
180			0.76
181		1.16	
182			0.77
183			0.68
184			0.77
185	2.01		
186		1.71	
187			0.86
188			0.34
189			0.85
190			0.45
191			0.57
192			0.46
193		1.38	
194		1.24	
195		1.19	
196			0.90
197			0.96
198		1.73	
199			0.48
200			0.77
201			0.92
202		1.13	
203		1.18	
204			0.38
205		1.12	
206			0.77
207			0.87

208			0.70
209			0.80
210			0.44
211			0.78
212			0.63
213			0.50
214			0.93
215			0.33
216			0.96
217		1.10	
218			0.52
219			0.37

2017

2017			
número de bloques	Bloques grandes, ≥ 2 metros	Bloques medianos, > 1 metro y < 2 metros	Bloques pequeños ≤ 1 metro
1	2.02		
2		1.29	
3		1.44	
4	2.13		
5			0.98
6			0.72
7			0.87
8			0.81
9			0.76
10		1.21	
11			0.93
12			0.92
13			0.23
14			0.81
15			0.89
16			0.80
17			0.81
18			0.41
19			0.89
20			0.96
21			0.95
22		1.85	
23	2.04		
24			0.82
25			0.77
26			0.68
27			0.84
28		1.04	
29		1.37	
30			0.69

31			0.37
32			0.34
33			0.61
34			0.63
35	5.69		
36		1.52	
37		1.29	
38			0.93
39		1.11	
40			0.72
41			0.83
42			0.47
43	2.71		
44		1.39	
45		1.10	
46		1.05	
47		1.26	
48	2.87		
49		1.38	
50			0.87
51			0.72
52			0.81
53		1.05	
54			0.43
55			0.47
56			0.65
57			0.74
58			0.94
59		1.23	
60		1.21	
61		1.36	
62			0.74
63		1.35	
64			0.96
65		1.30	
66			0.51
67			0.68
68			0.39
69			0.51
70		1.11	
71		1.10	
72		1.05	
73		1.35	
74			0.80
75			0.97
76			0.73
77		1.36	
78			0.81
79			0.71

80			0.62
81			0.66
82		1.22	
83		1.33	
84		0.59	
85			0.78
86			0.64
87			0.68
88			0.95
89			0.64
90		1.40	
91			0.85
92			0.58
93			0.60
94			0.48
95			0.80
96			0.57
97		1.33	
98	2.86		
99		1.31	
100		1.65	
101			0.68
102			0.97
103		1.09	
104		1.06	
105		1.30	
106		1.15	
107		1.43	
108			0.57
109			0.96
110		1.02	
111		1.08	
112			0.74
113		1.11	
114		1.15	
115		1.29	
116			0.78
117			0.88
118			0.65
119		1.25	
120		1.61	
121		1.51	
122	2.30		
123		1.80	
124		1.59	
125			0.61
126			0.90
127		1.86	
128		1.20	
129		1.13	

130		1.84	
131		1.69	
132			0.63
133		1.41	
134		1.64	
135		1.32	
136			0.77
137			0.94
138			0.69
139		1.02	
140	2.41		
141		1.49	
142		1.67	
143	3.49		
144	2.10		
145		1.35	
146		1.48	
147			0.54
148			0.91
149		1.21	
150		1.45	
151	2.05		
152		1.39	
153		1.53	
154			0.65
155			0.63
156		1.51	
157			0.95
158		1.12	
159		1.65	
160		1.46	
161		1.42	
162		1.17	
163			0.61
164			0.74
165			0.44
166		1.10	
167			0.68
168			0.99
169			0.99
170			0.31
171			0.16
172			0.31
173			0.33
174			0.43
175			0.39
176			0.90
177			0.31
178			0.80

179	2.02		
180			0.60
181			0.30
182			0.20
183			0.17
184			0.38

2018JUN

2018JUN			
número de bloques	Bloques grandes, ≥ 2 metros	Bloques medianos, > 1 metro y < 2 metros	Bloques pequeños ≤ 1 metro
1	2.77		
2			0.63
3			0.77
4		1.70	
5		1.59	
6		1.47	
7		1.21	
8		1.46	
9		1.56	
10		1.11	
11			0.79
12			0.94
13			0.91
14			0.70
15	2.25		
16		1.33	
17			0.72
18			0.97
19			0.83
20			0.87
21		1.07	
22		1.14	
23		1.82	
24		1.12	
25	2.18		
26	2.10		
27		1.15	
28		1.21	
29			0.84
30		1.30	

31		1.15	
32		1.53	
33		1.64	
34			0.98
35		1.05	
36		1.19	
37			0.93
38		1.48	
39		1.93	
40		1.24	
41			0.88
42			0.85
43		1.65	
44		1.72	
45		1.37	
46			0.75
47	2.20		
48		1.04	
49		1.13	
50		1.39	
51	3.40		
52		1.19	
53		1.47	
54			0.72
55		1.48	
56		1.42	
57		1.21	
58		1.66	
59	2.70		
60	2.99		
61		1.73	
62	2.73		
63		1.65	
64	2.34		
65		1.83	
66		1.63	
67		1.23	
68	2.02		
69		1.78	
70	2.06		
71		1.54	
72		1.45	
73		1.69	

74		1.59	
75		1.45	
76		1.77	
77		1.97	
78	2.81		
79		1.25	
80		1.42	
81		1.21	
82		1.23	
83		1.58	
84	2.45		
85	2.01		
86			0.88
87		1.21	
88	2.30		
89		1.59	
90			0.57
91	2.07		
92	4.43		
93	2.74		
94	3.67		
95		1.30	
96		1.84	
97		1.49	
98		1.28	
99		1.68	
100	2.42		
101		1.20	
102		1.14	
103			0.63
104		1.42	
105		1.01	
106	3.58		
107		1.81	
108	2.20		
109		1.33	
110		1.96	
111	2.50		
112		1.62	
113		1.86	
114			0.87
115			0.98
116	2.02		
117		1.40	

118		1.22	
119		1.57	
120	3.61		
121		1.30	
122		1.97	
123		1.65	
124			0.86
125		1.70	
126		1.70	
127	2.31		
128		1.68	
129		1.09	
130		2.00	
131	2.87		
132		1.46	
133	2.23		
134	2.57		
135		1.29	
136			0.96
137		1.54	
138		1.77	
139			0.66
140		1.15	
141		1.73	
142			0.86
143			0.68
144		1.02	
145		1.41	
146			0.92
147			0.68
148		1.36	
149			0.94
150		1.70	
151		1.16	
152			0.65
153			0.43
154		1.96	
155			0.88
156		1.01	
157		1.37	
158		1.35	
159		1.31	
160		1.05	

161		1.05	
162			0.77
163			0.93
164			0.83
165			0.64
166		1.32	
167			0.64
168			0.61
169		1.08	
170		1.65	
171			0.89
172			0.97
173			0.95
174		1.23	
175		1.80	
176		1.24	
177			0.86
178		1.08	
179		1.04	
180			0.73
181			0.55
182		1.46	
183		1.01	
184		1.16	
185			0.70

2018NOV

2018NOV			
número de bloques	Bloques grandes , \geq 2 metros	Bloques medianos , $>$ 1 metro y $<$ 2 metros	Bloques pequeños \leq 1 metro
1		1.40	
2		1.42	
3		1.19	
4		1.25	
5		1.52	
6		1.21	
7			0.73
8		1.09	
9		1.28	
10		1.02	
11		1.05	
12			0.88
13			0.83

14			0.57
15			0.39
16		1.82	
17			0.77
18		1.03	
19		1.31	
20	3.01		
21	2.35		
22		1.74	
23			0.72
24			0.78
25			0.72
26		1.64	
27			0.95
28		1.04	
29		1.67	
30		1.40	
31		1.79	
32		1.15	
33			0.65
34			0.60
35			0.63
36			0.62
37			0.31
38		1.06	
39			0.51
40			0.58
41			0.54
42			0.37
43			0.49
44			0.82
45			0.40
46			0.94
47			0.72
48			0.64
49			0.52
50			0.80
51			0.56
52			0.56
53			0.56
54			0.65
55			0.80
56			0.98
57			0.54
58		1.54	
59		1.35	
60			0.97
61			0.75
62		1.90	

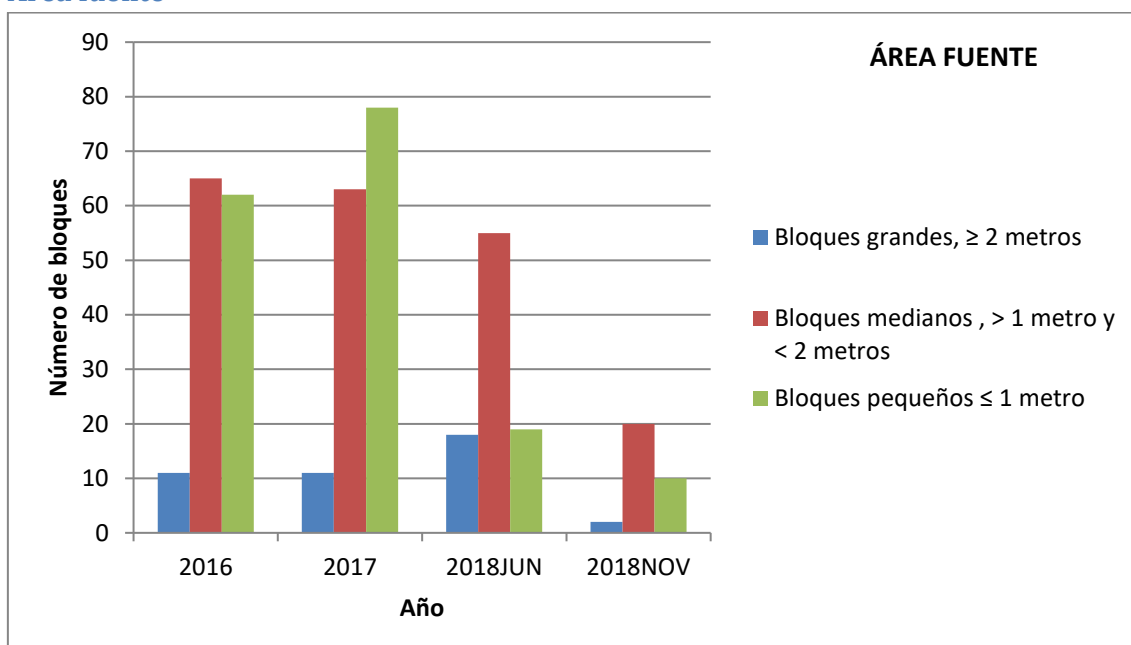
63			0.59
64		1.08	
65			0.48
66		1.08	
67			0.90
68			0.68
69		1.52	
70			0.52
71			0.60
72		1.32	
73		1.60	
74			0.87
75			0.56
76		1.51	
77		1.31	
78			0.74
79			0.78
80		1.37	
81			0.65
82		1.65	
83			0.43
84			0.95
85			0.63
86		1.38	
87		1.22	
88		1.42	
89		1.59	
90			0.67
91			0.52
92			0.55
93			0.87
94			0.48
95			0.42
96			0.50
97			0.58
98			0.60
99			0.55
100			0.79
101			0.80
102			0.54
103			0.55
104			0.34
105			0.76
106			0.56
107			0.63
108			0.41
109			0.79
110			0.75
111			0.45
112			0.61

113			0.49
114			0.75
115			0.40
116			0.28
117			0.85

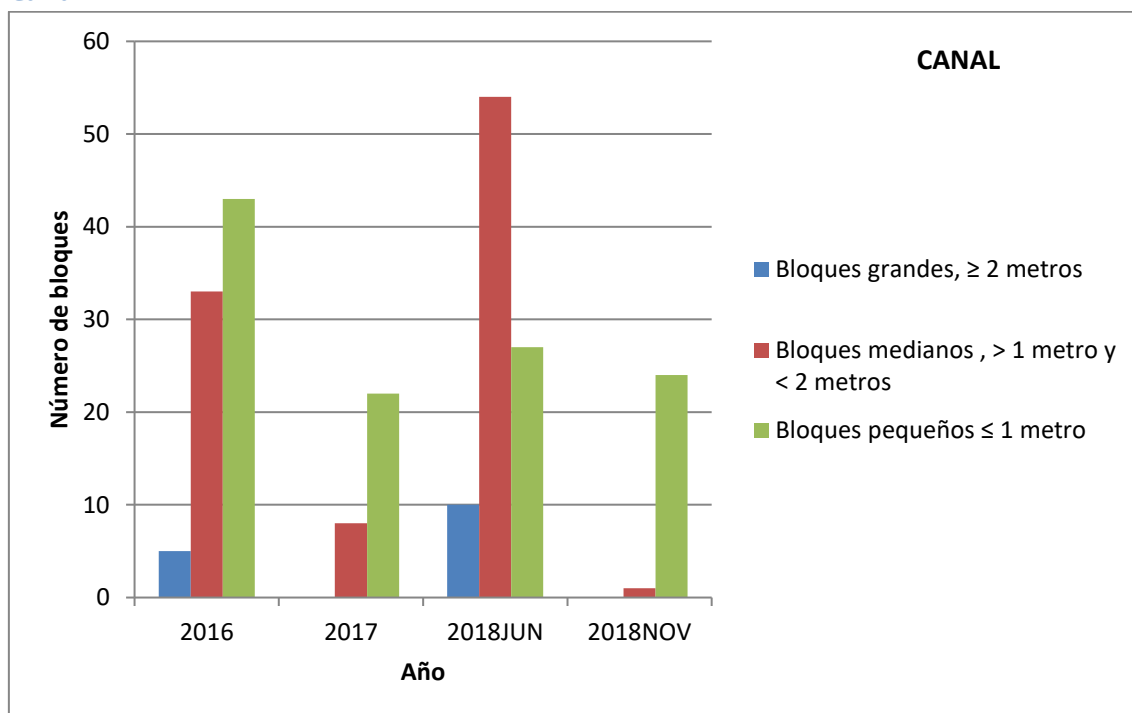
Anejo 3. Tabla de bloques clasificados según tamaño, y partes del barranco, e histogramas de cada una de las partes.

	Nº ROCAS											
	Bloques grandes, ≥ 2 metros				Bloques medianos > 1 metro y < 2 metros				Bloques pequeños ≤ 1 metro			
	2016	2017	2018JUN	2018NOV	2016	2017	2018JUN	2018NOV	2016	2017	2018JUN	2018NOV
Área fuente	11	11	18	2	65	63	55	20	62	78	19	10
Canal	5	0	10	0	33	8	54	1	43	22	27	24
Cono deyección	0	0	0	0	1	3	2	16	21	11	43	44

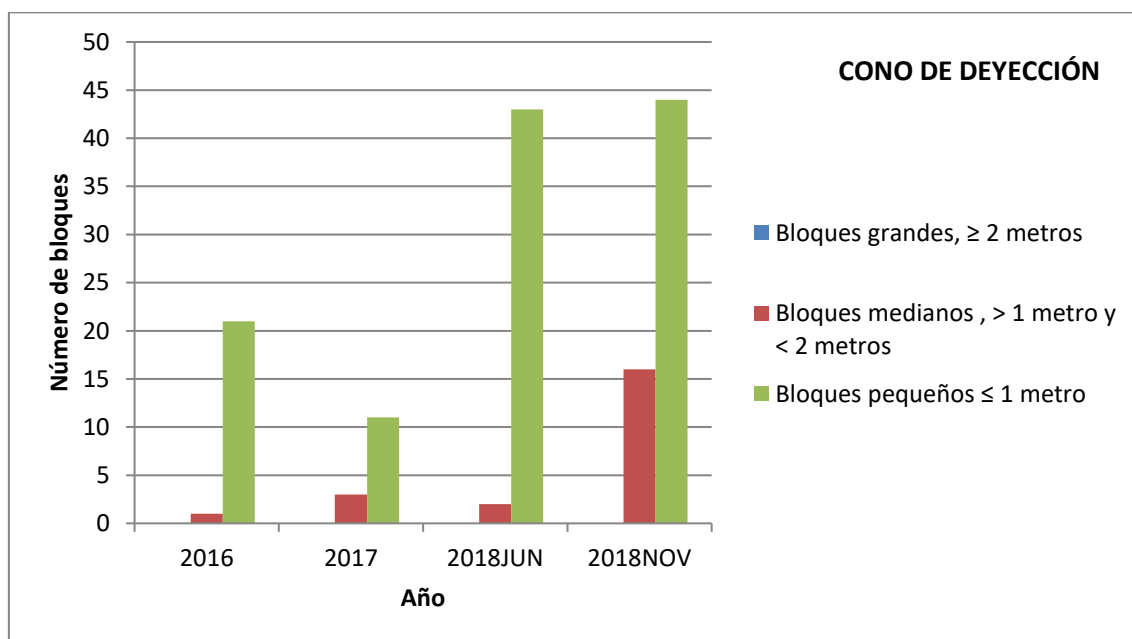
Área fuente



Canal

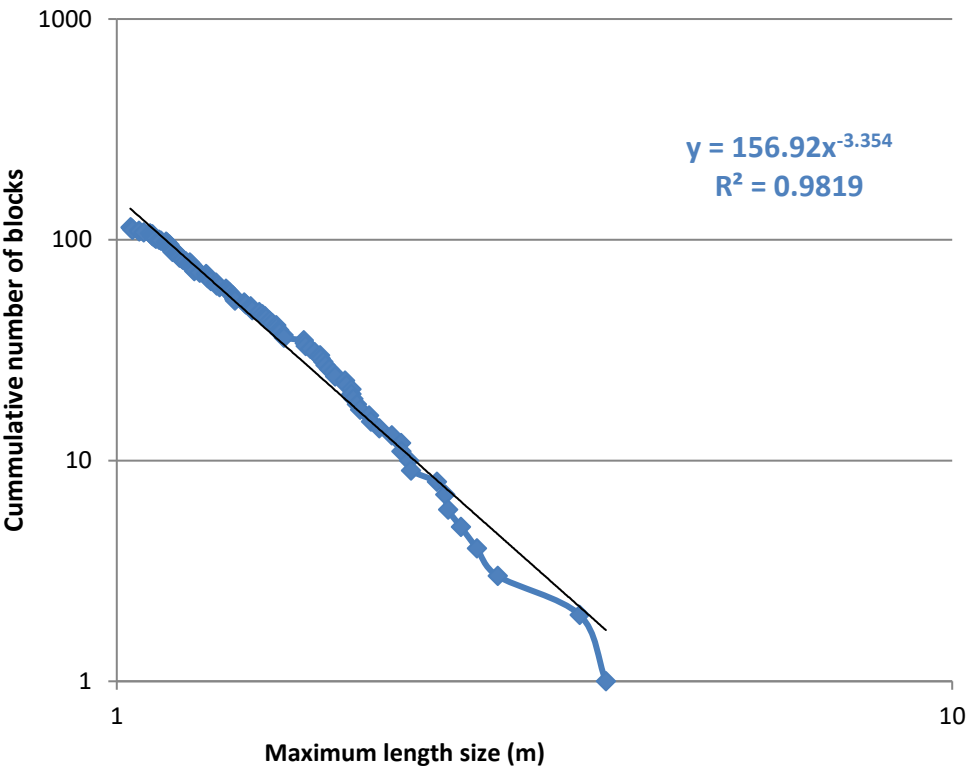


Cono de deyección

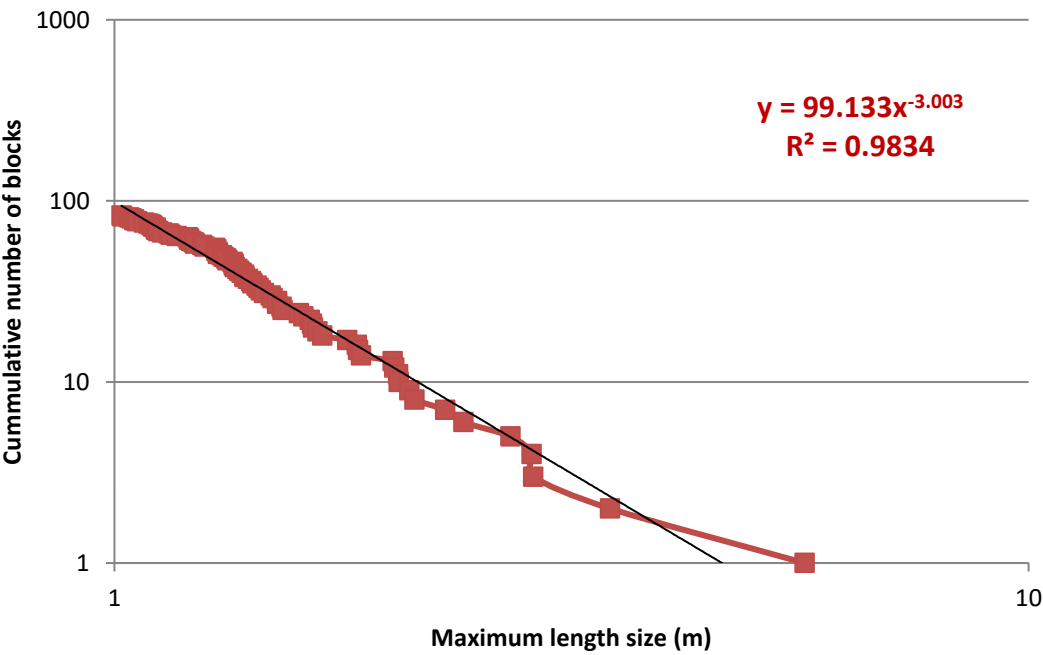


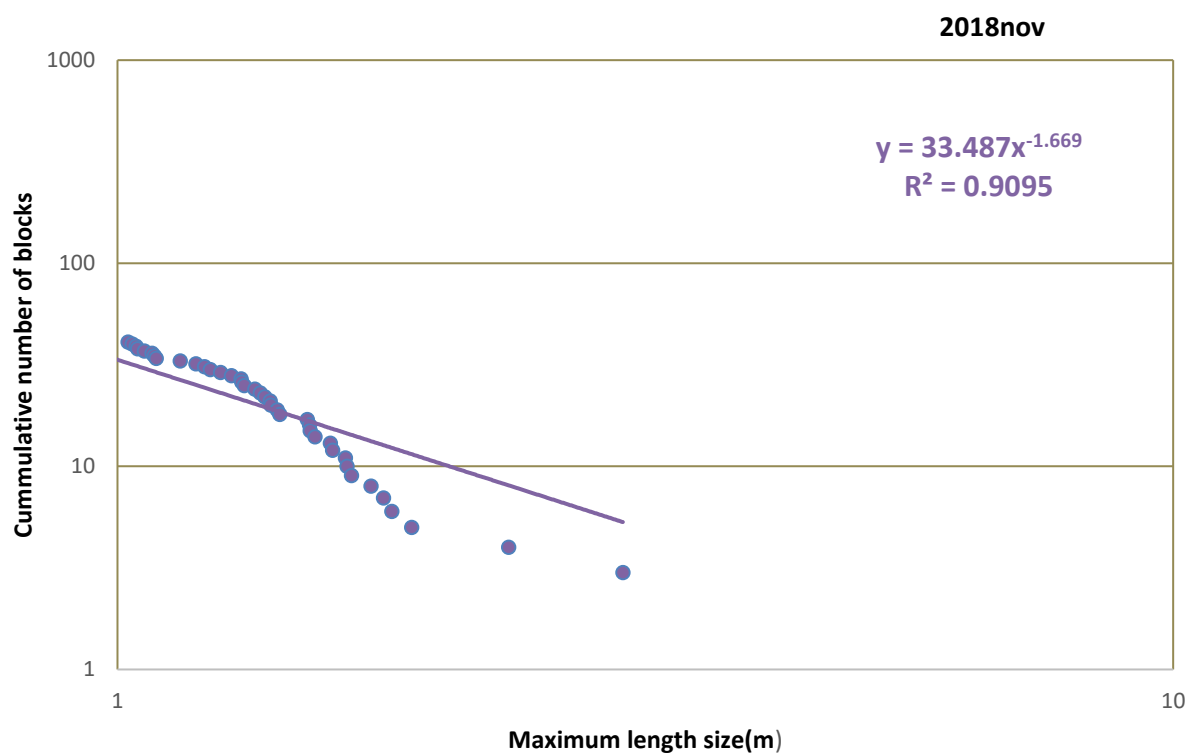
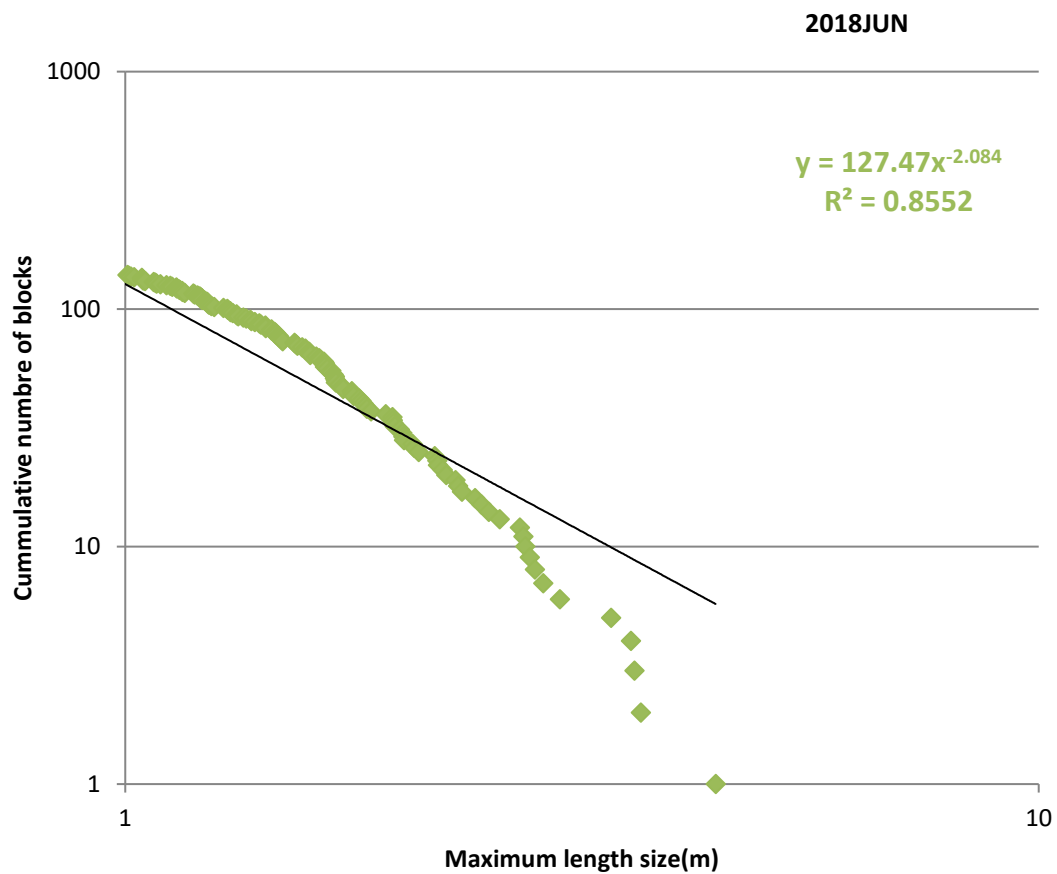
Anejo 4. Distribuciones fractales

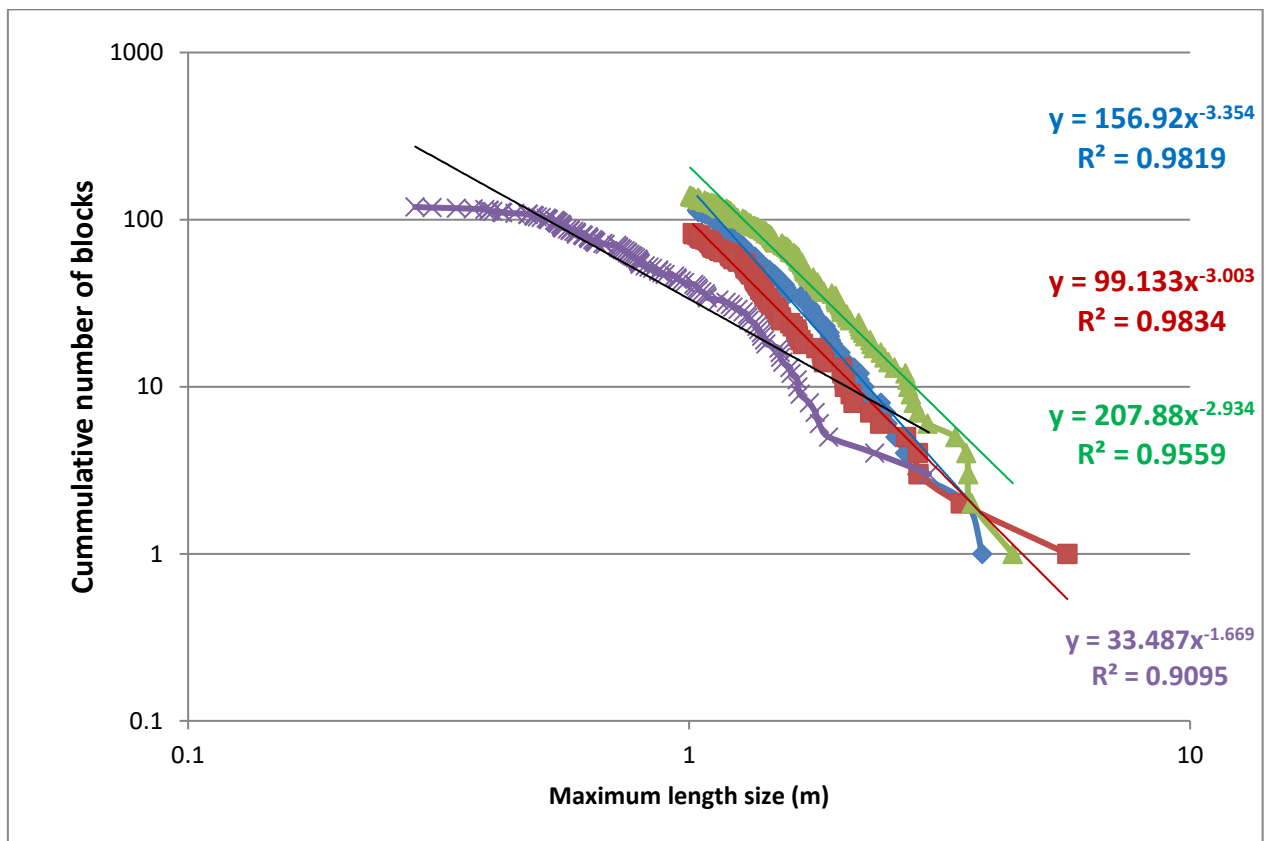
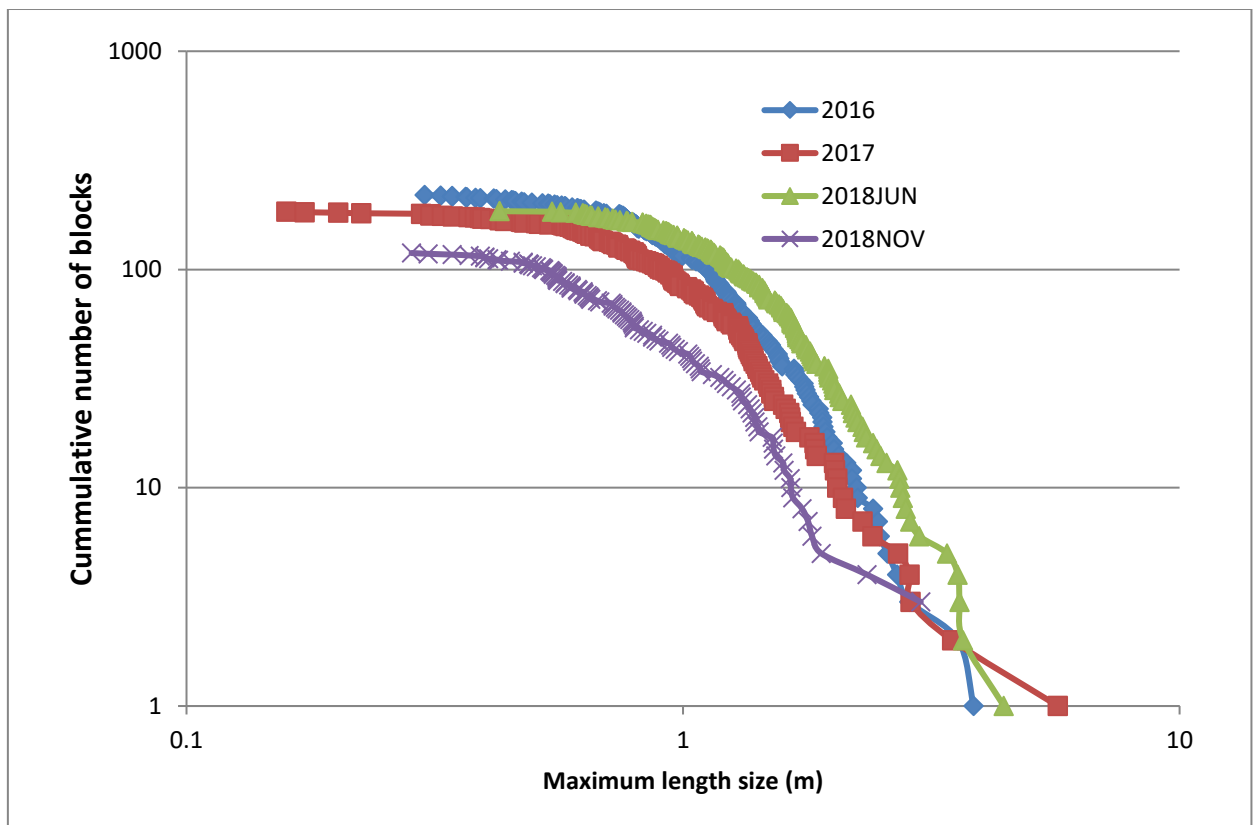
2016



2017







Anejo 5. Tabla volumen de bloques >2 metros desprendidos, e histogramas.

2016

id	AREA16	lado	RADIO	VOLUMEN ESFERA
1	1.25	1.12	0.56	0.73
2	16.77	4.09	2.05	35.95
3	1.55	1.25	0.62	1.01
4	0.64	0.80	0.40	0.27
5	3.37	1.84	0.92	3.24
6	3.57	1.89	0.95	3.54
7	1.46	1.21	0.60	0.92
8	1.77	1.33	0.66	1.23
9	2.21	1.49	0.74	1.72
10	1.58	1.26	0.63	1.04
11	6.83	2.61	1.31	9.35
12	2.98	1.73	0.86	2.70
13	4.43	2.11	1.05	4.89
14	3.52	1.88	0.94	3.46
15	2.48	1.57	0.79	2.04
16	2.07	1.44	0.72	1.56
17	2.46	1.57	0.78	2.03
18	2.71	1.64	0.82	2.33
SUMATORIO	61.66		15.41	78.01

2017

id	A17_1	lado	RADIO	VOLUMEN ESFERA
1	3.12	1.77	0.88	2.89
2	2.45	1.57	0.78	2.01
3	2.05	1.43	0.72	1.54
5	2.93	1.71	0.86	2.63
6	13.15	3.63	1.81	24.97
7	6.03	2.46	1.23	7.75
8	3.14	1.77	0.89	2.92
9	2.55	1.60	0.80	2.13
10	2.69	1.64	0.82	2.31
11	3.59	1.89	0.95	3.56
12	4.74	2.18	1.09	5.40
13	2.38	1.54	0.77	1.93
14	2.25	1.50	0.75	1.77
15	1.14	1.07	0.53	0.64
16	1.01	1.00	0.50	0.53
17	1.63	1.28	0.64	1.09
18	2.15	1.47	0.73	1.65
19	1.46	1.21	0.60	0.92
SUMATORIO	58.48			66.64

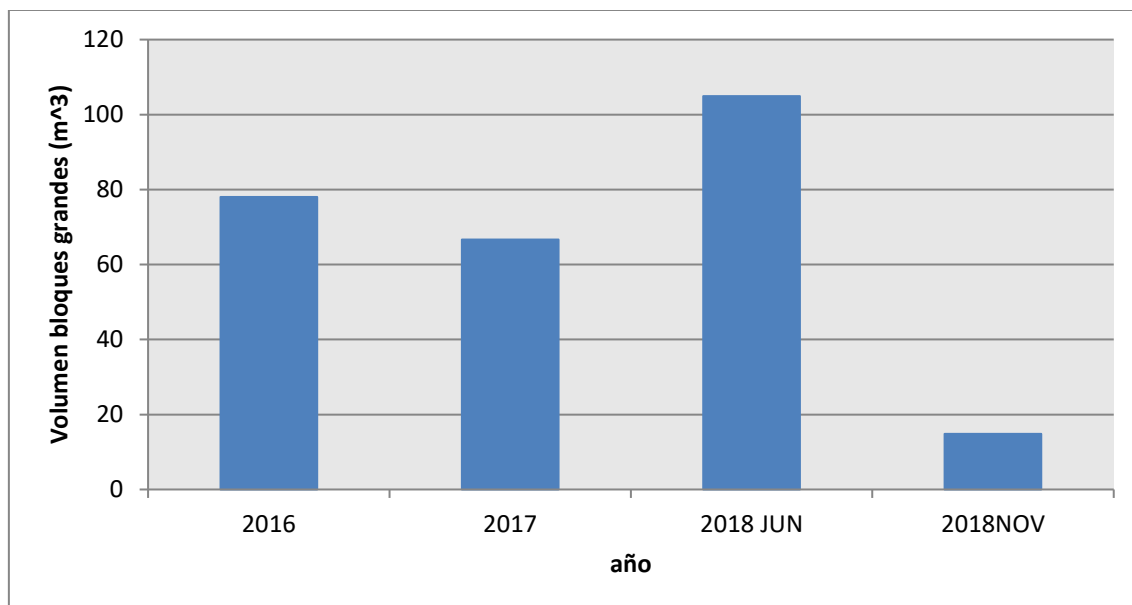
2018JUN

id	A18JUN	lado	RADIO	VOLUMEN ESFERA
1	7.03	2.65	1.33	9.76
2	4.34	2.08	1.04	4.73
3	2.93	1.71	0.86	2.63
4	3.29	1.81	0.91	3.13
5	2.17	1.47	0.74	1.67
6	5.16	2.27	1.14	6.14
7	2.36	1.54	0.77	1.90
8	2.73	1.65	0.83	2.36
9	0.99	1.00	0.50	0.52
10	3.45	1.86	0.93	3.36
11	3.19	1.79	0.89	2.98
12	2.60	1.61	0.81	2.20
13	1.74	1.32	0.66	1.20
14	4.04	2.01	1.01	4.25
15	2.03	1.43	0.71	1.52
16	2.20	1.48	0.74	1.71
17	0.95	0.98	0.49	0.49
18	2.27	1.51	0.75	1.79
19	7.52	2.74	1.37	10.79
20	3.55	1.89	0.94	3.51
21	6.04	2.46	1.23	7.77
22	2.40	1.55	0.78	1.95
23	6.12	2.47	1.24	7.93
24	2.93	1.71	0.86	2.63
25	2.71	1.64	0.82	2.33
26	2.41	1.55	0.78	1.95
27	4.72	2.17	1.09	5.37
28	1.89	1.38	0.69	1.36
29	2.19	1.48	0.74	1.69
30	3.26	1.81	0.90	3.08
31	2.64	1.63	0.81	2.25
SUMATOR	101.86			104.95

2018NOV

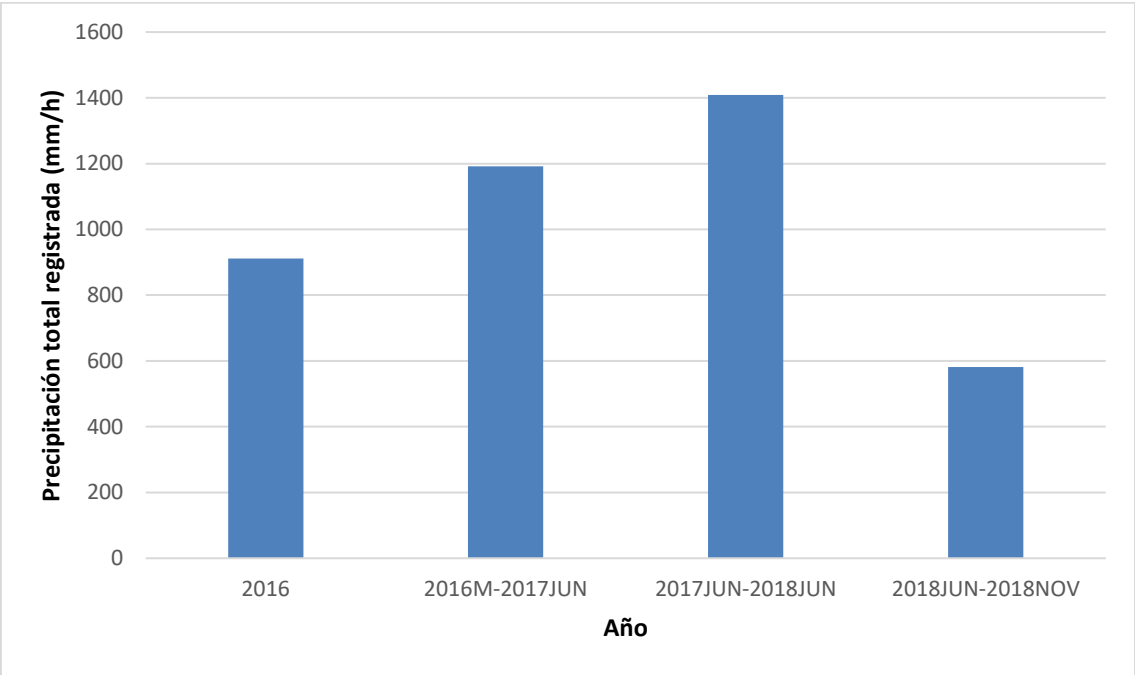
id	A18JUN	lado	RADIO	VOLUMEN ESFERA
1	6.37	2.52	1.26	8.42
2	3.14	1.77	0.89	2.91
3	1.00	1.00	0.50	0.53
4	1.90	1.38	0.69	1.37
5	0.23	0.48	0.24	0.06
6	0.41	0.64	0.32	0.14
7	0.97	0.98	0.49	0.50
8	0.54	0.74	0.37	0.21
10	0.19	0.43	0.22	0.04
11	1.14	1.07	0.53	0.64
SUMATOR	15.89			14.81

AÑO	VOLUMEN BLOQUES GRANDES (m3)
2016	78.0056
2017	66.6406
2018 JUN	104.9482
2018NOV	14.8078



Anejo 6. Datos pluviométricos año 2016-2017-2018.

AÑO	PRECIPITACIÓN TOTAL (mm/h)
2016	911
2016M-2017JUN	1191.4
2017JUN-2018JUN	1409
2018JUN-2018NOV	581.399999

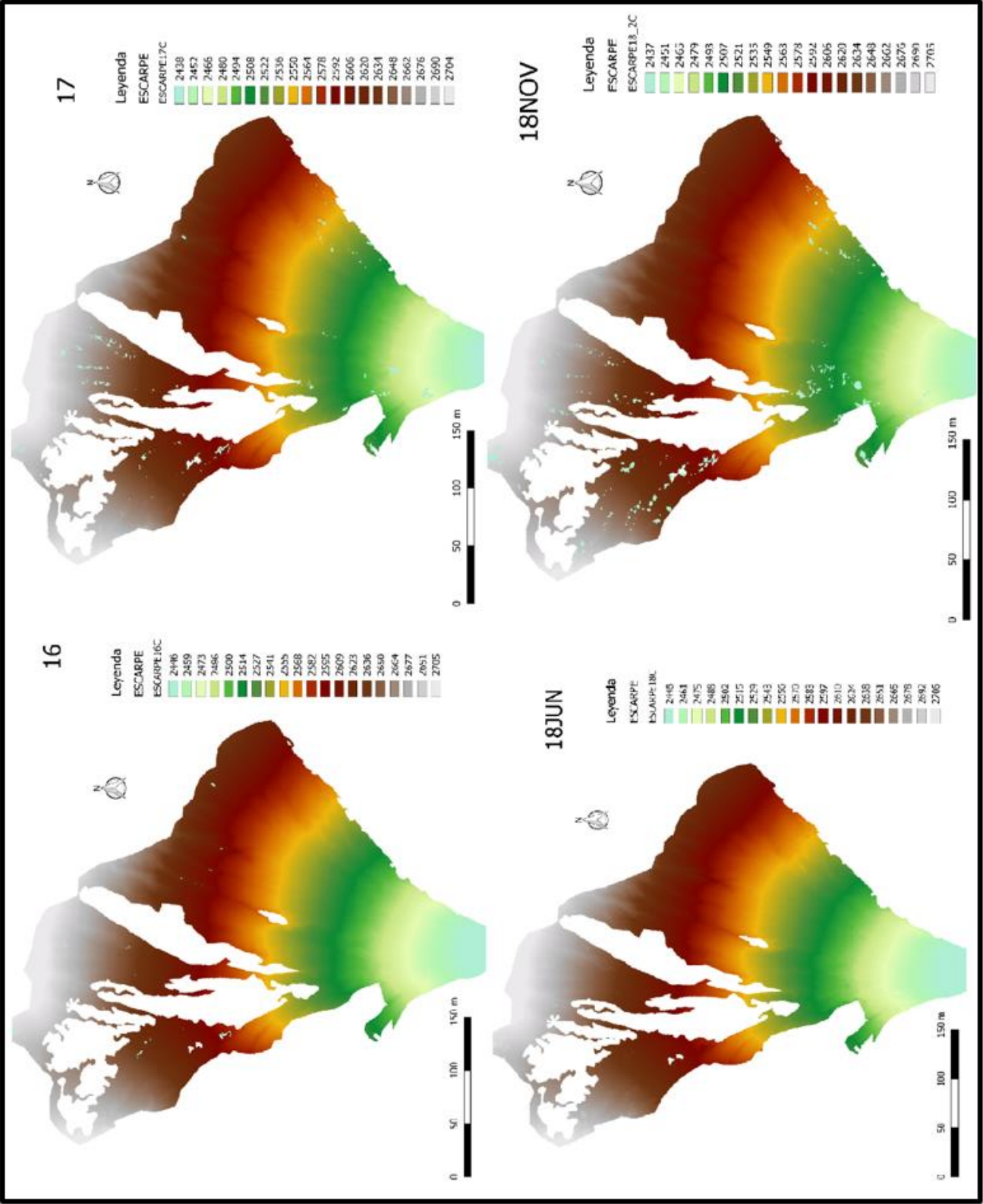


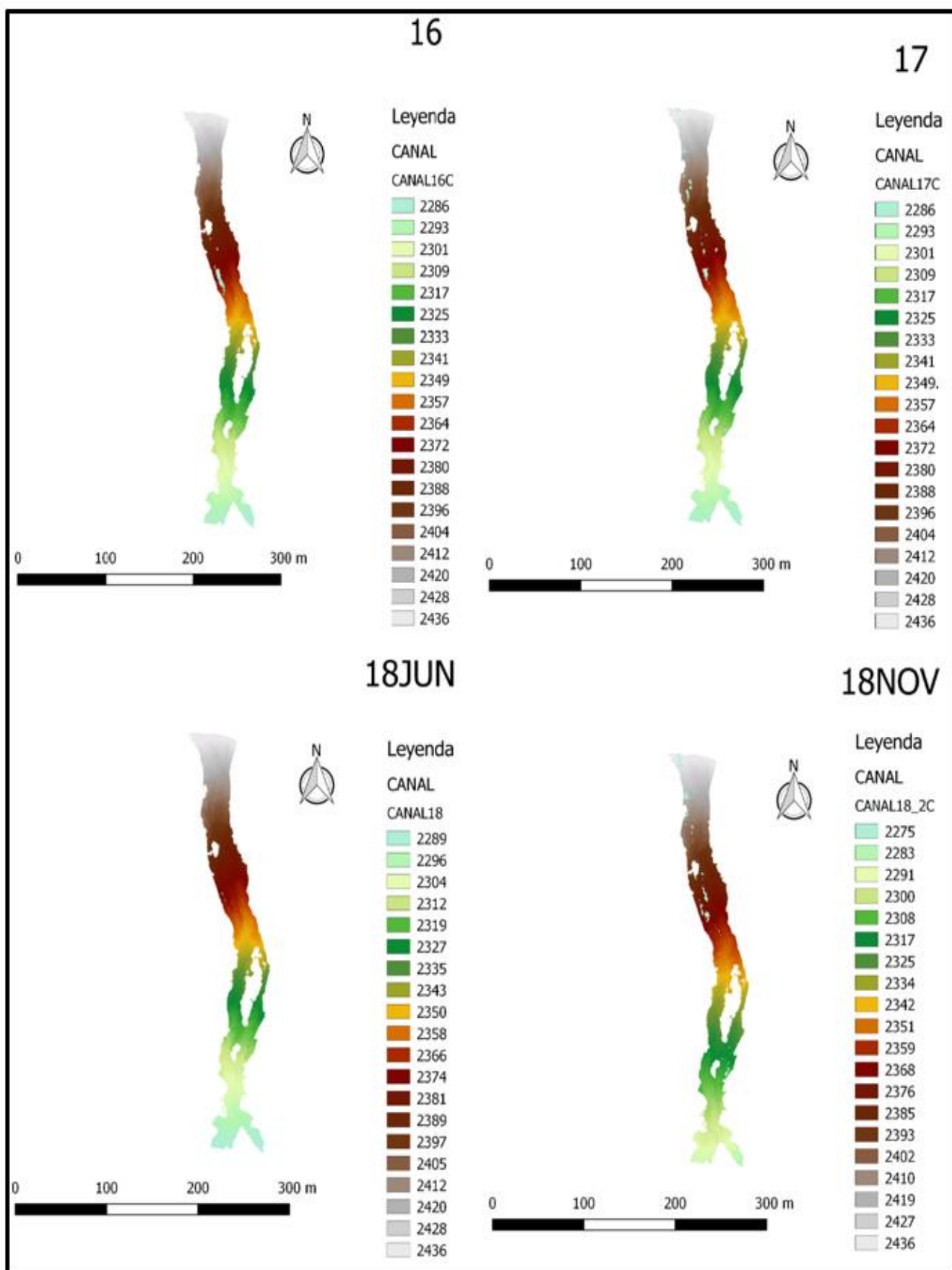
Anejo7. Tablas de datos de los eventos anuales, y volumen anual desprendido por año.

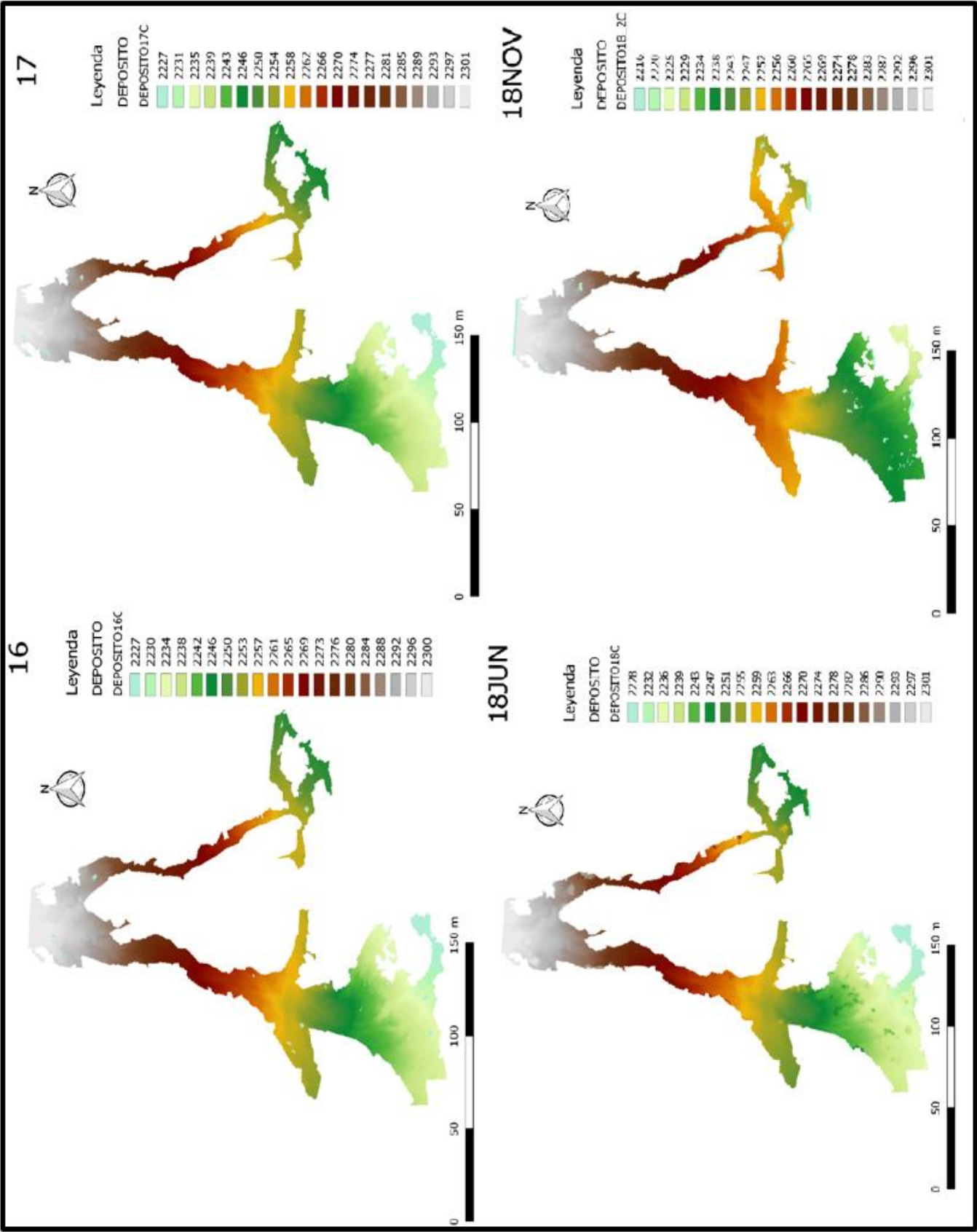
Año	Anual volumen (m3)
01/01/2016	0
31/12/2016	0
01/01/2017	7700
31/12/2017	7700
01/01/2018	2500
31/12/2018	2500

Eventos volumétricos (m3)		
22/05/2017 15:22	DFlood	800
10/07/2017 2:55	DFlow	2950
21/07/2017 7:08	DFlow	3100
06/08/2017 0:14	Dflood	600
06/08/2017 2:32	Dflood	250
05/09/2018 17:49	DFlow	2500

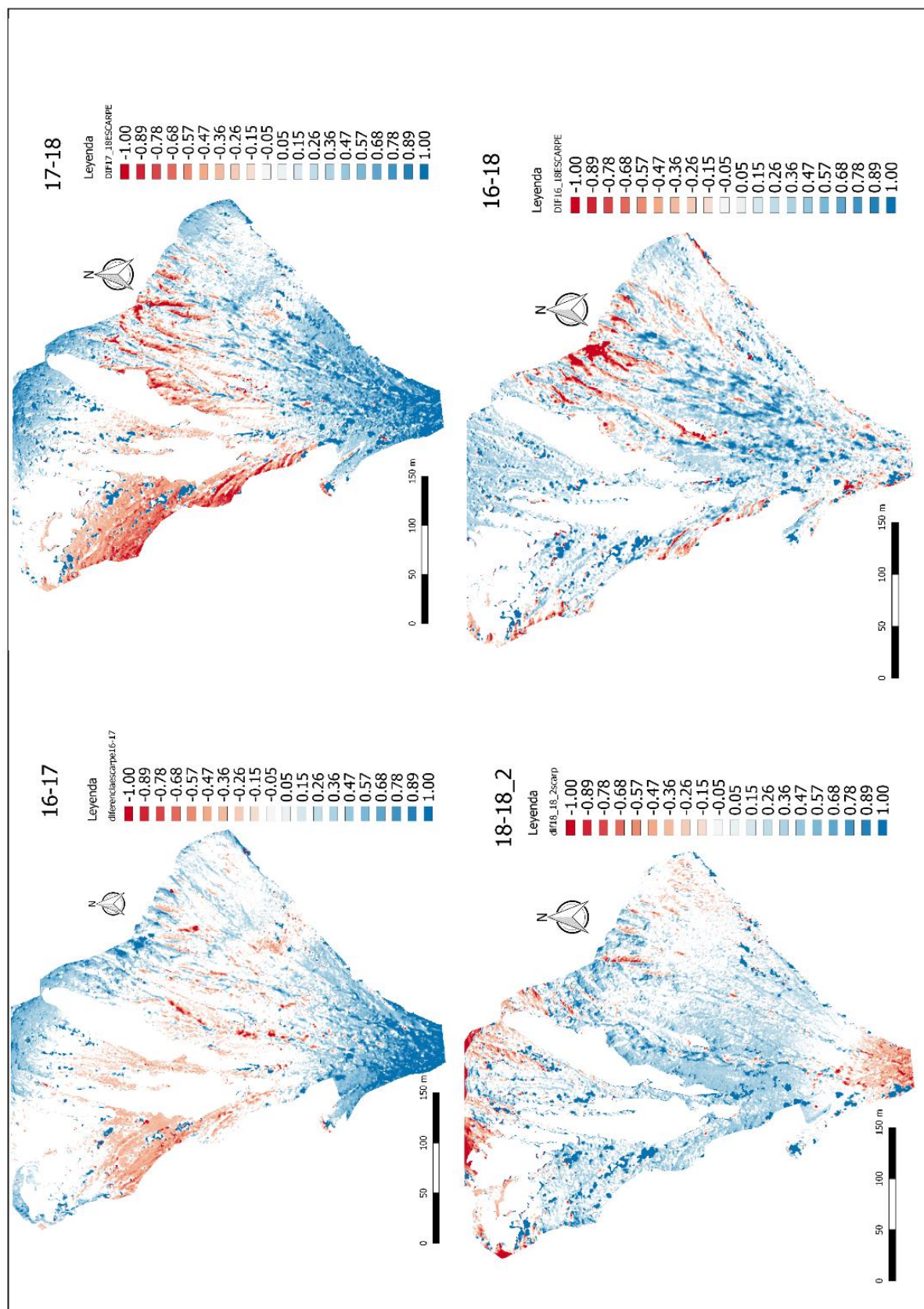
Anejo 8. Modelos de elevación digital del área fuente, canal, y cono de deyección.

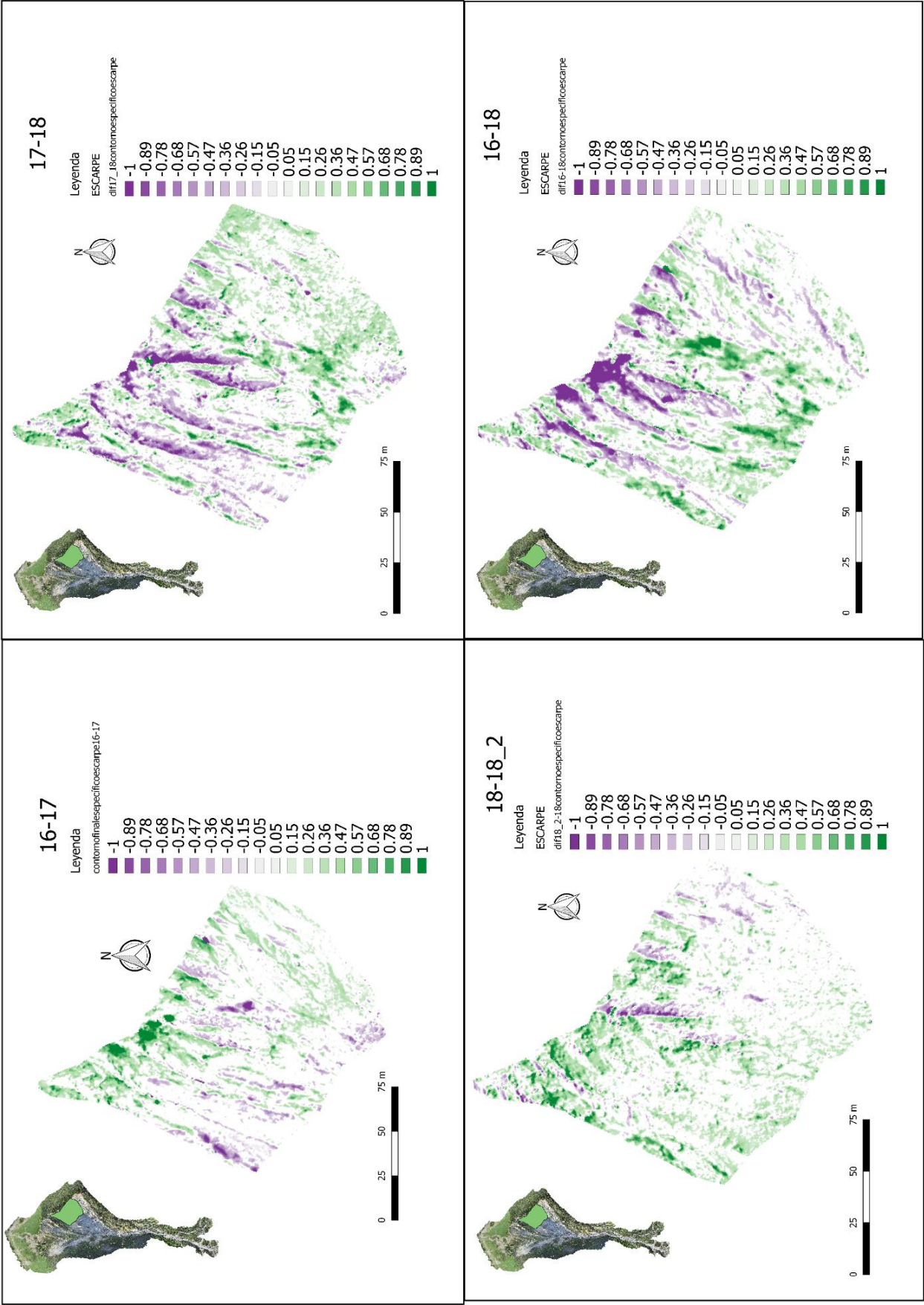


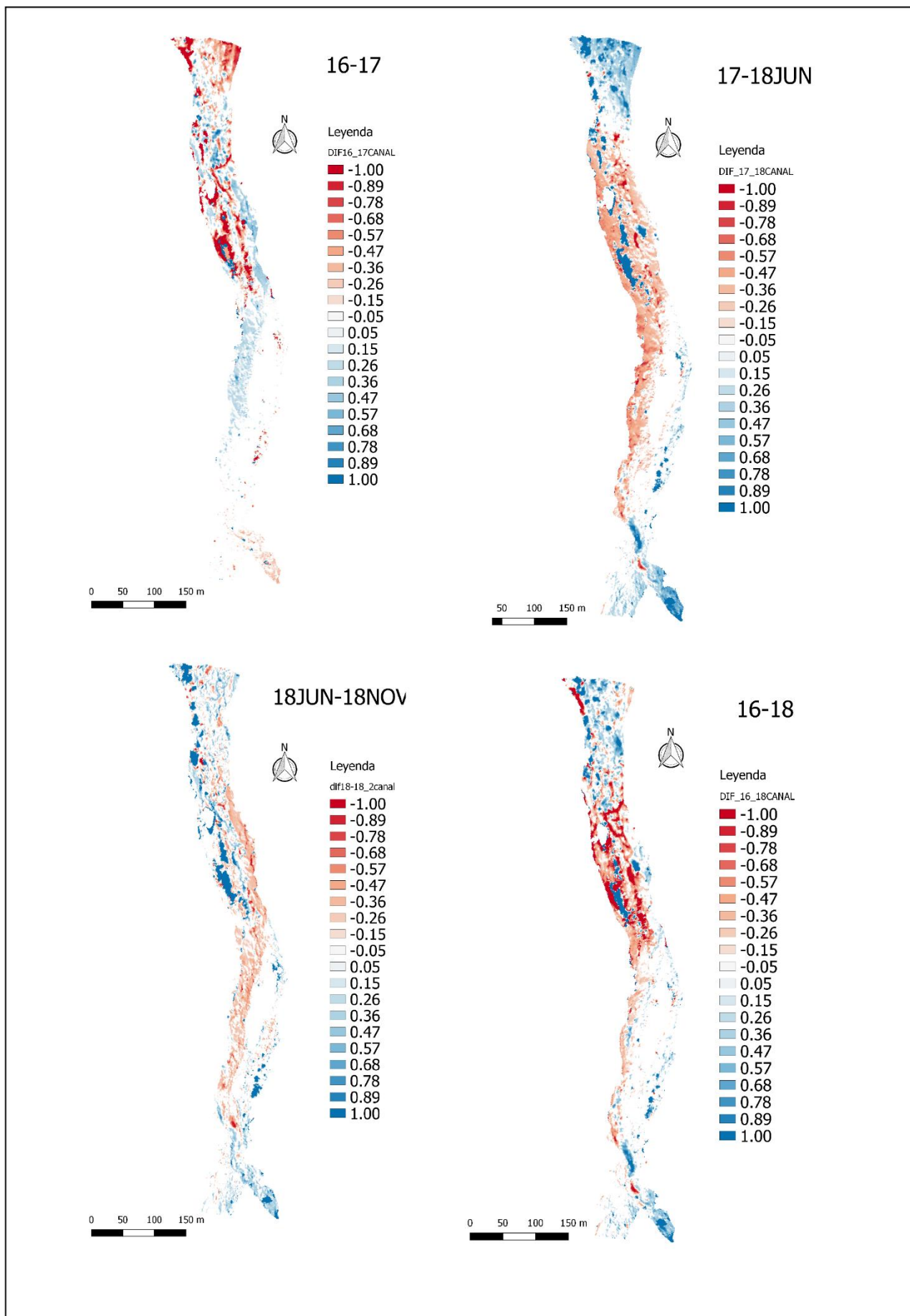


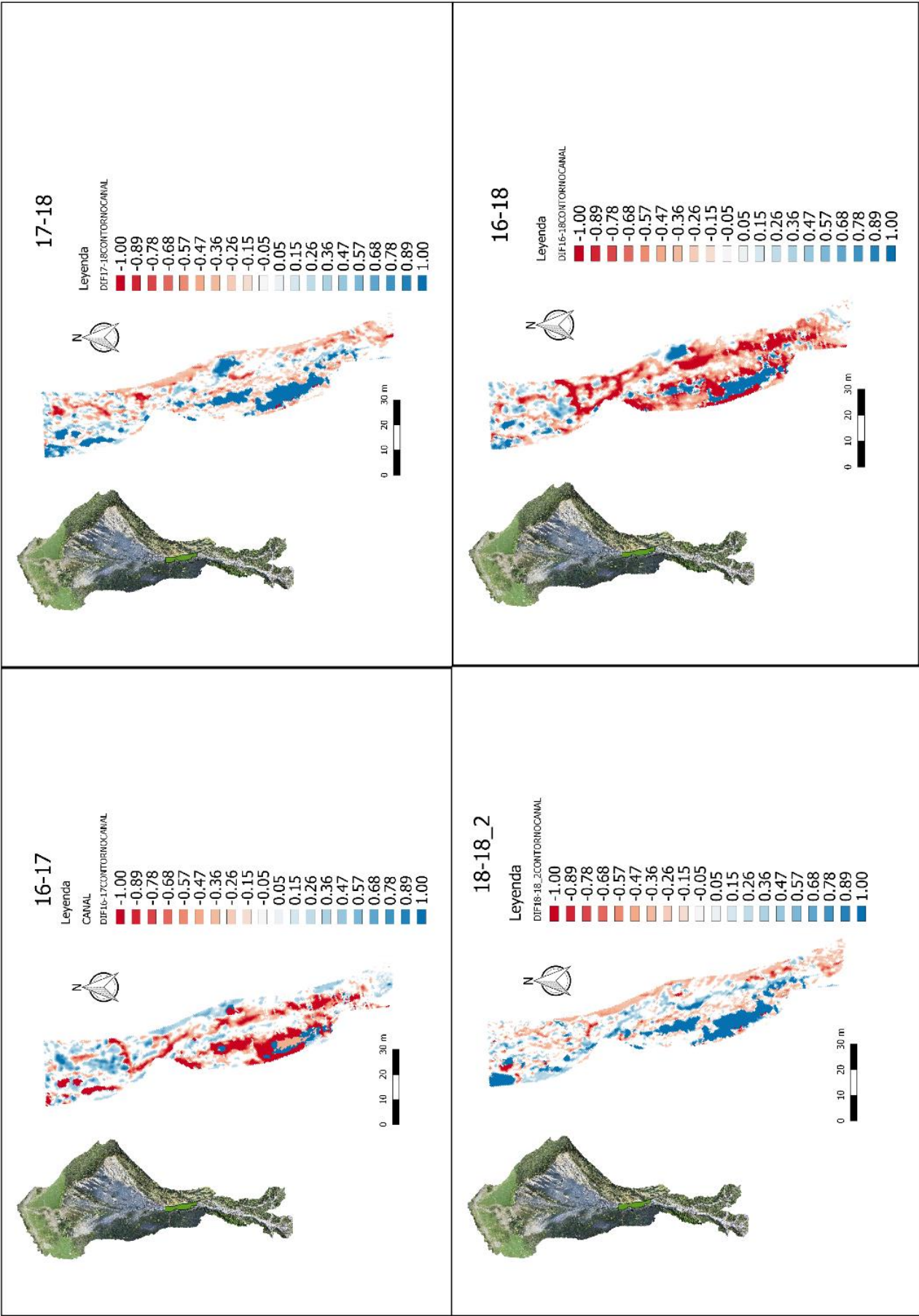


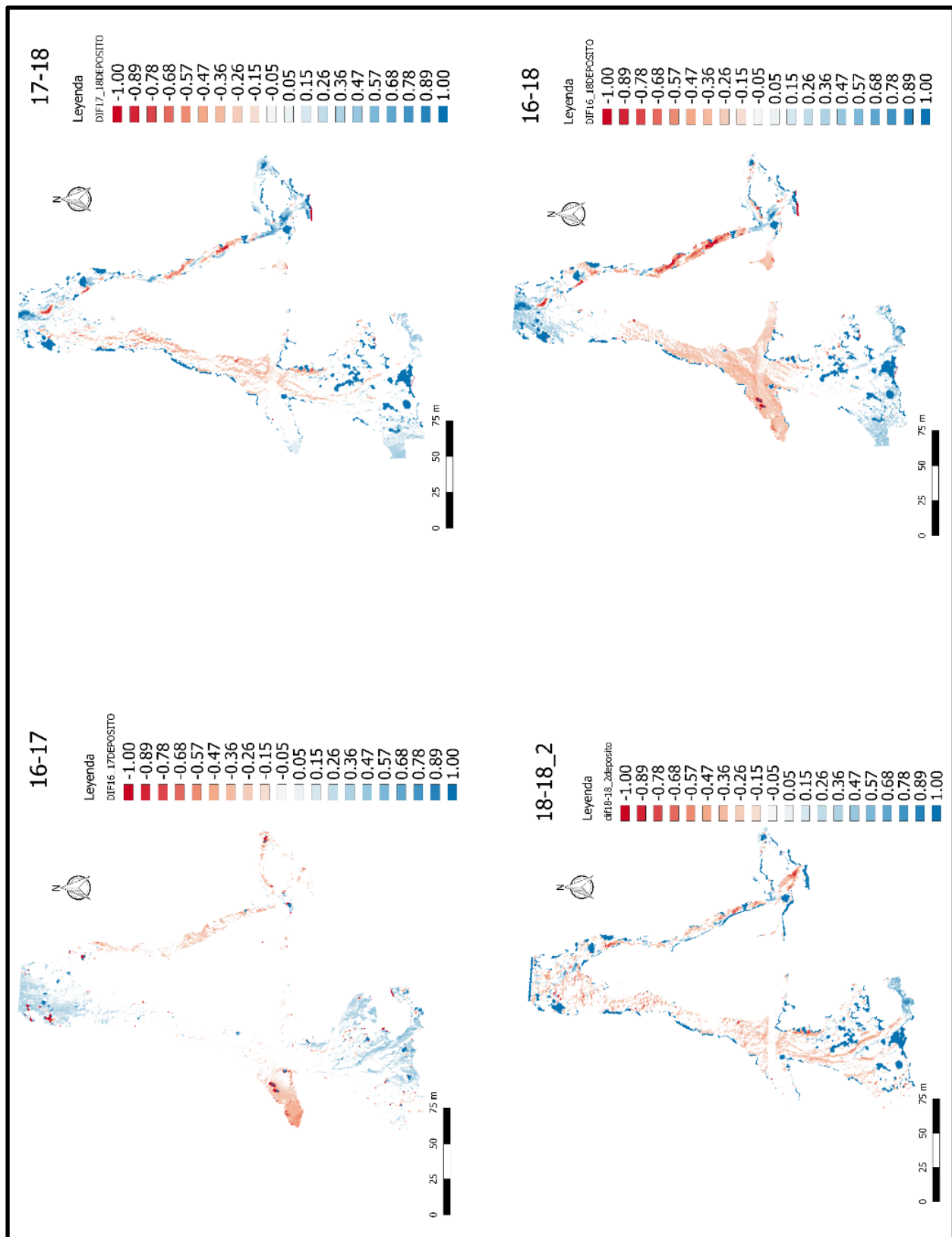
Anejo 9. Plantilla mapa de diferencias de erosión- depósito del área fuente, canal, y depósito, y plantillas de mapa de diferencias de los contornos específicos.



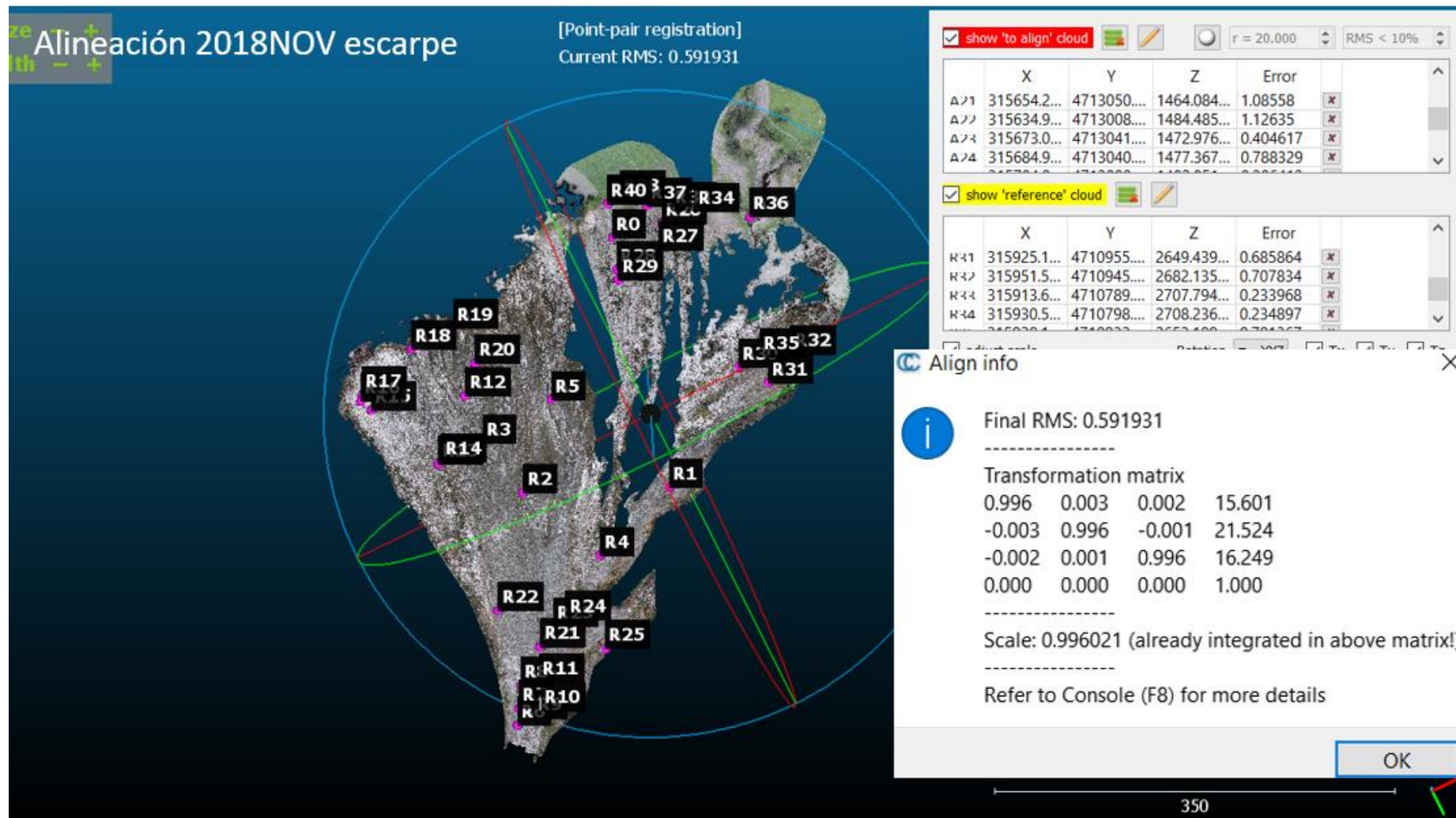


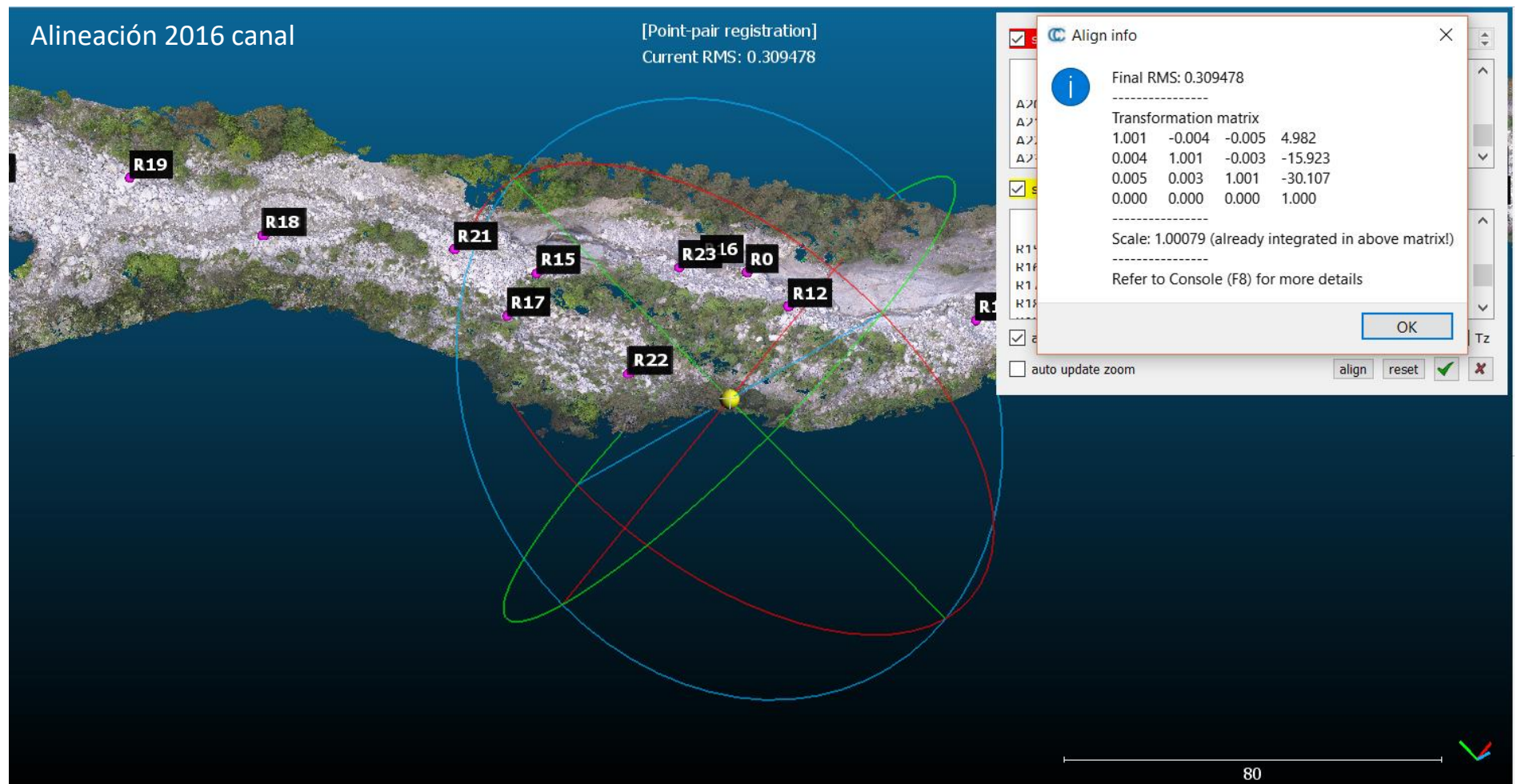


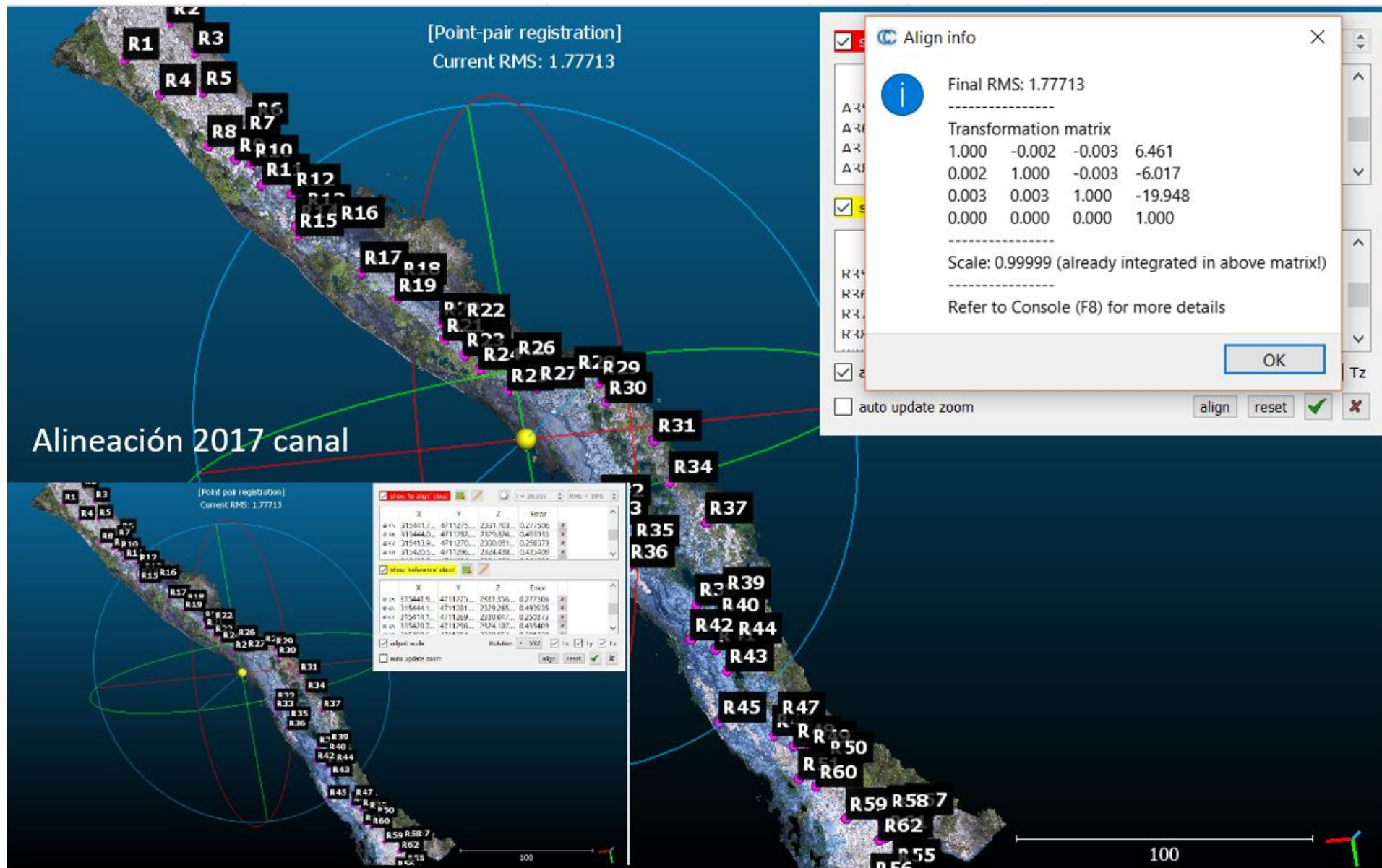


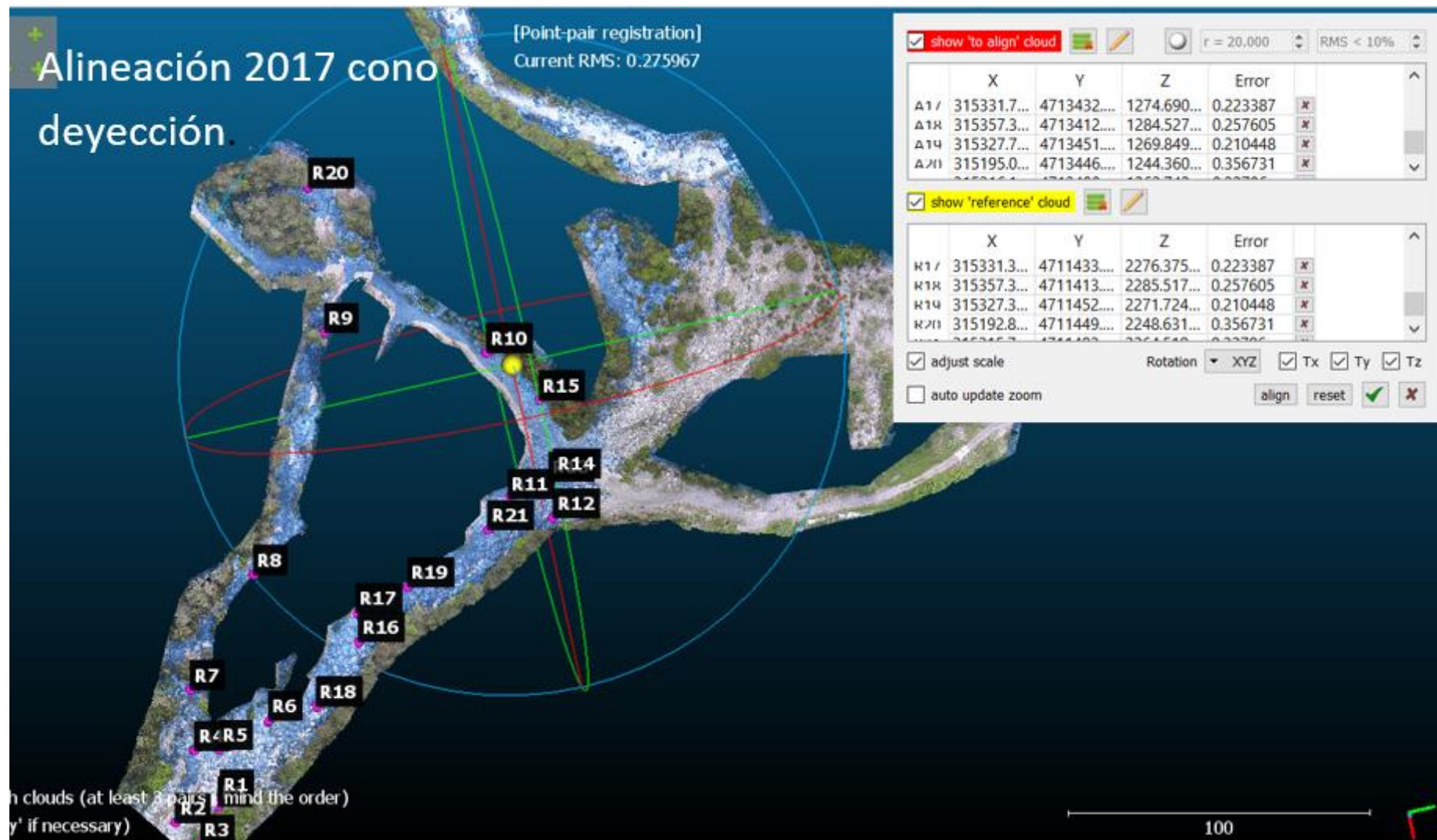


Anejo 10. Algunas alineaciones realizadas de la zona del área fuente, canal y cono de deyección.



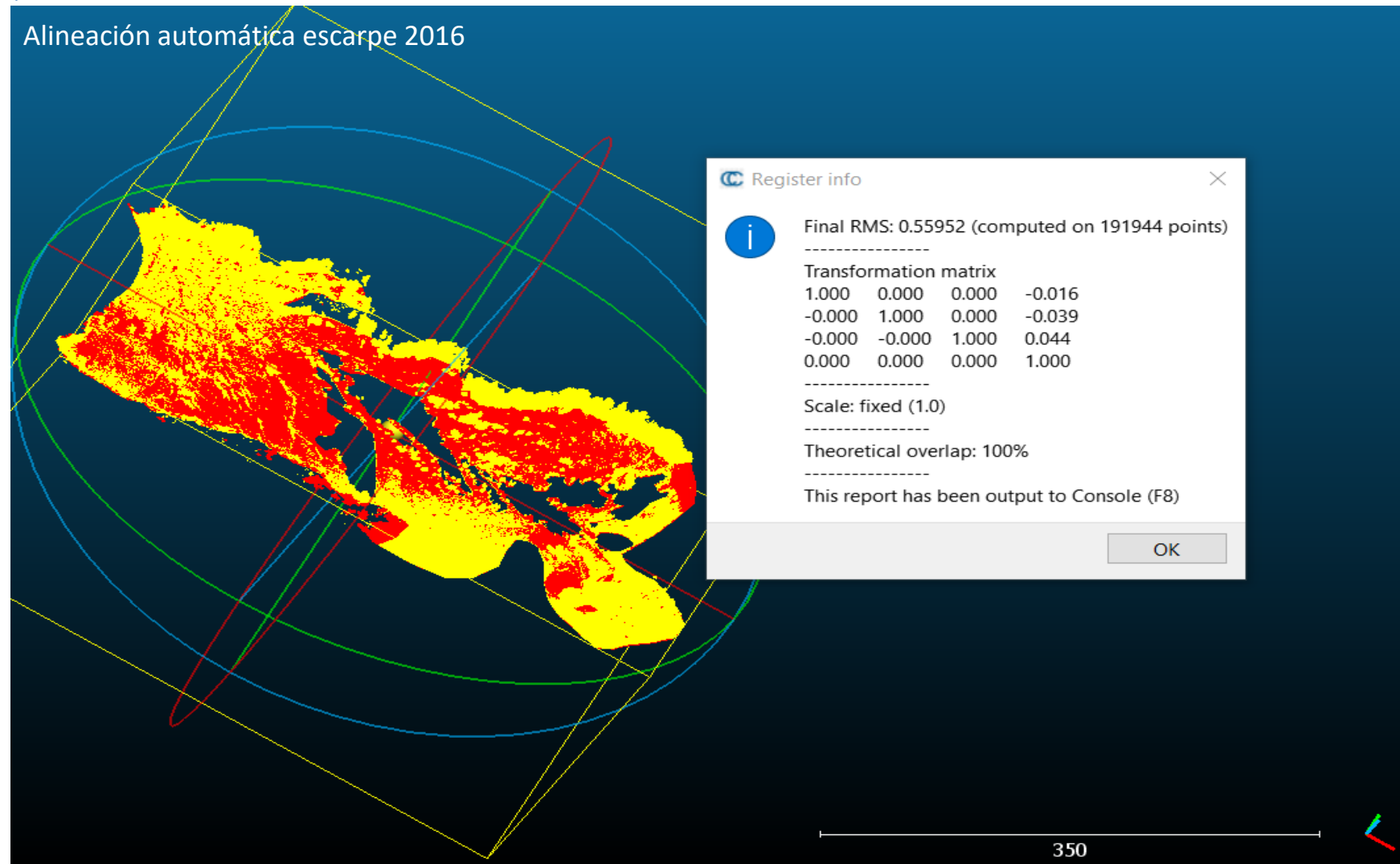




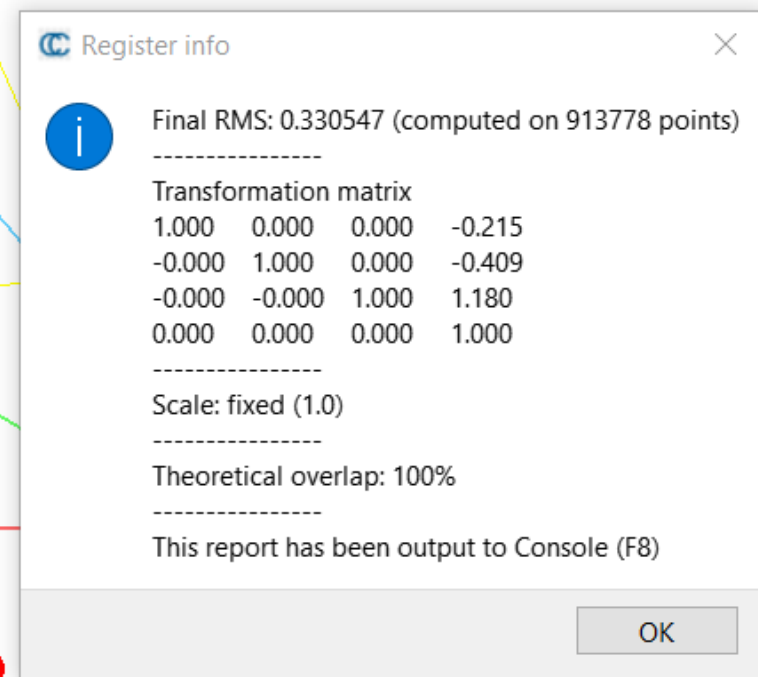
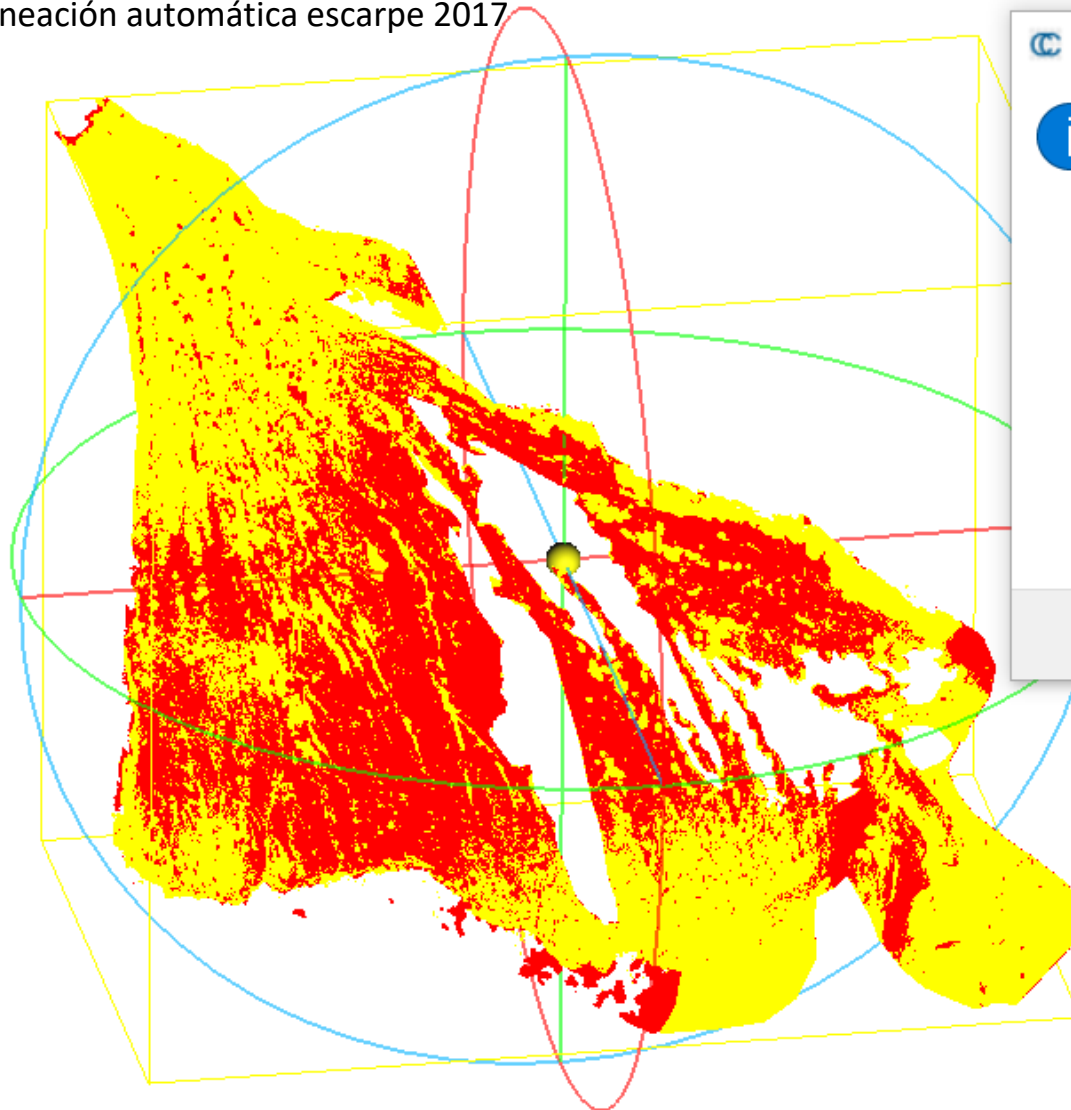


Anejo 11. Alineaciones automáticas

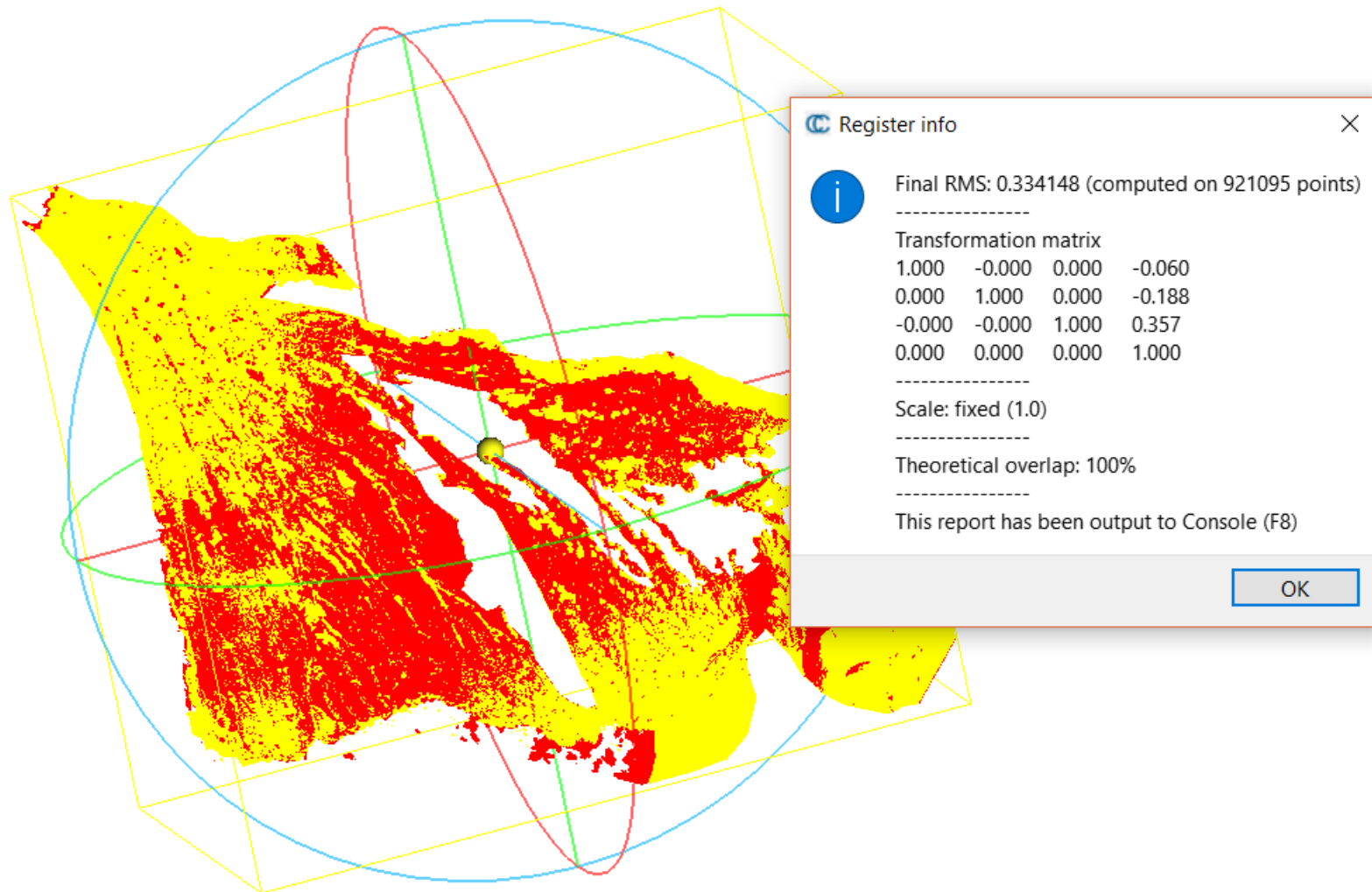
Alineación automática escarpe 2016



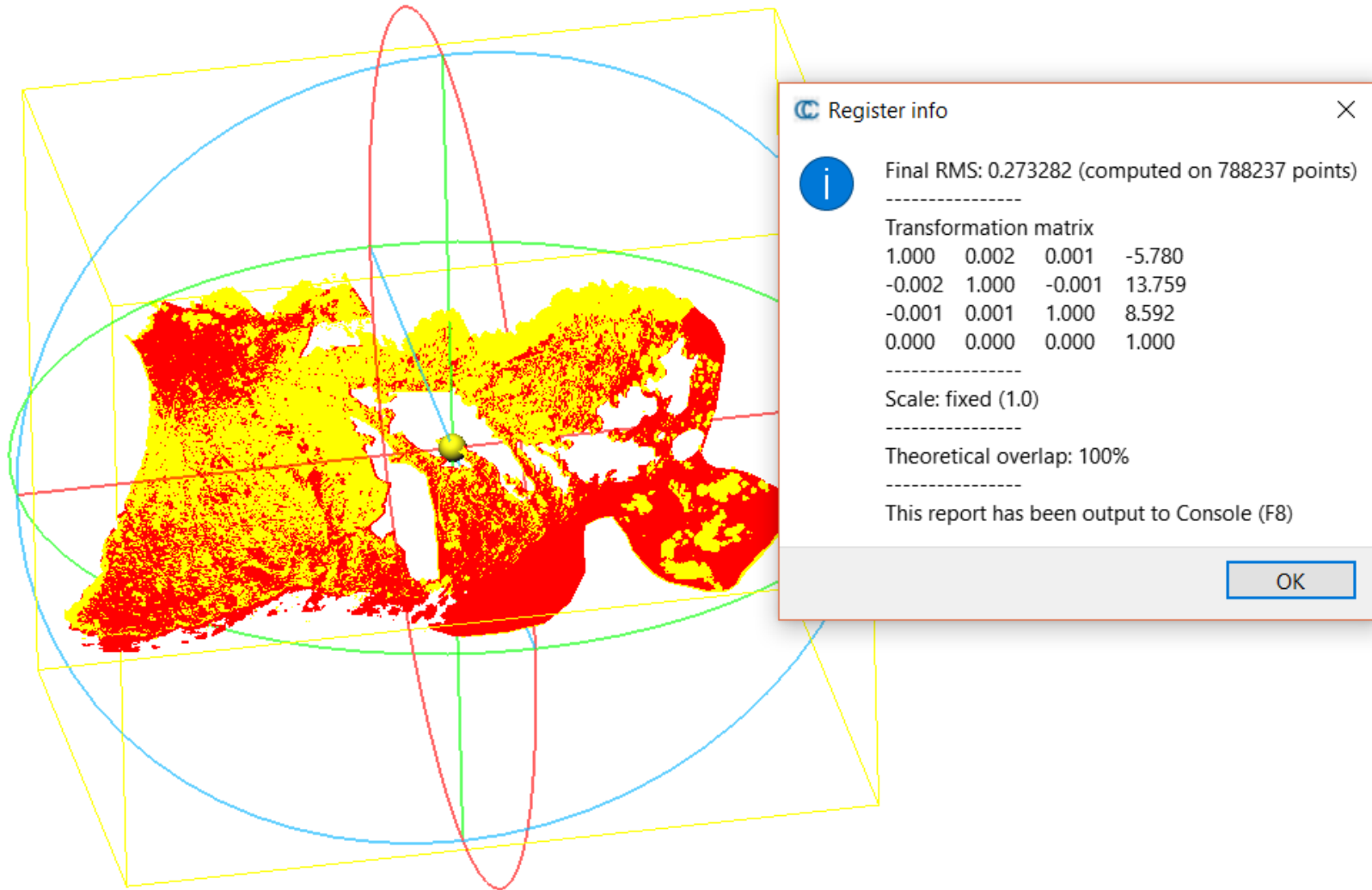
Alineación automática escarpe 2017



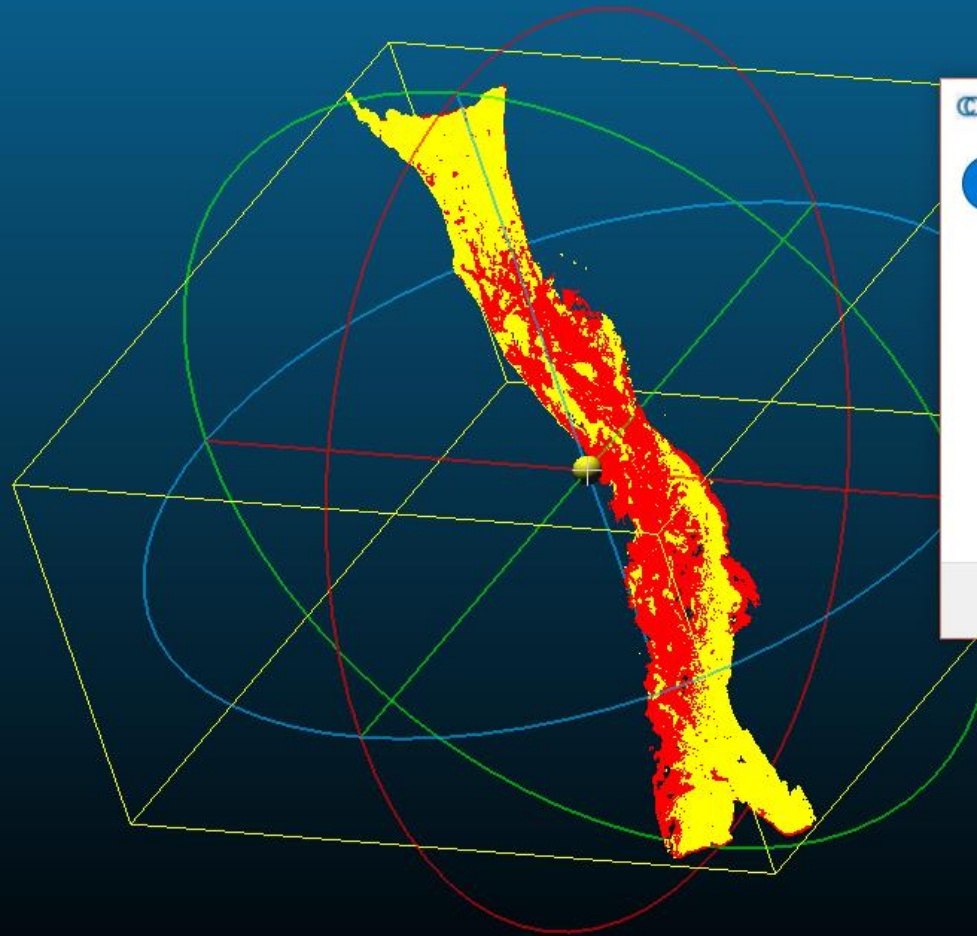
Alineación automática escarpe 2018



Alineación automática escarpe 2018NOV



Alineación automática canal 2017



Register info

Final RMS: 0.221026 (computed on 639256 points)

Transformation matrix

1.000	-0.001	-0.001	3.010
0.001	1.000	-0.001	-6.528
0.001	0.001	1.000	-5.972
0.000	0.000	0.000	1.000

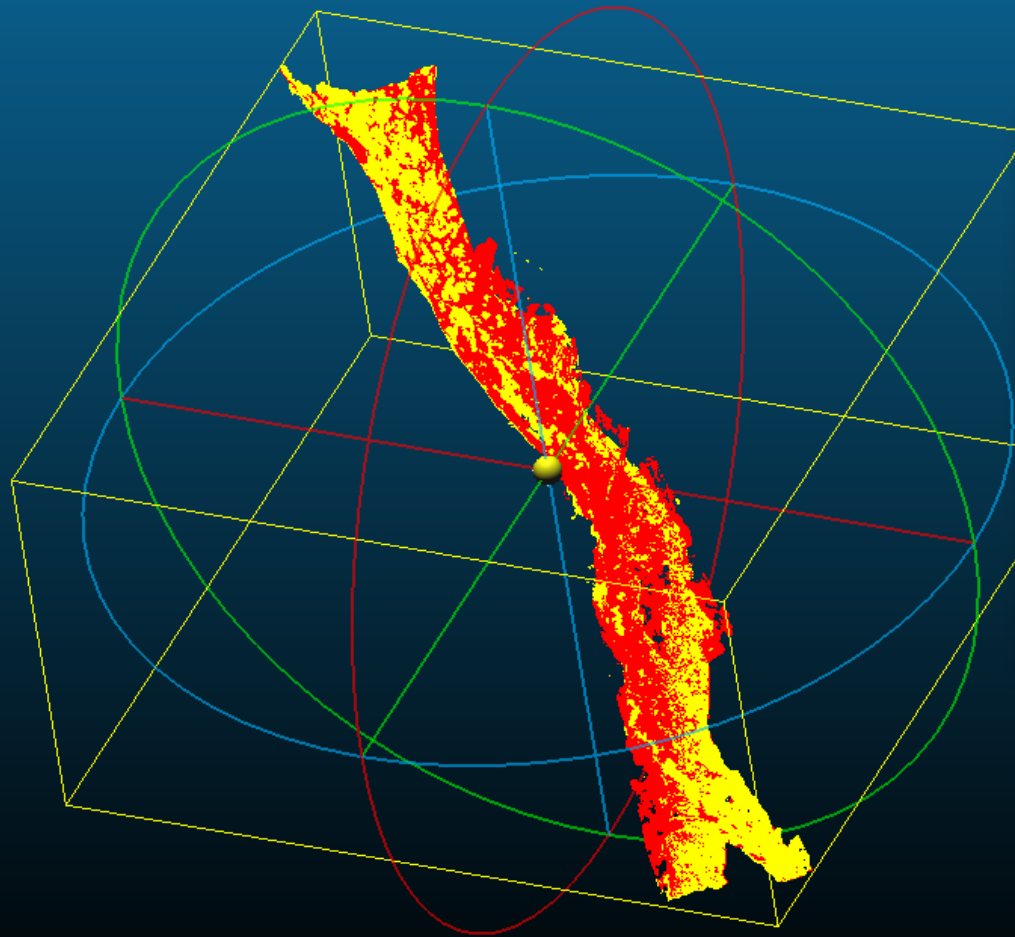
Scale: fixed (1.0)

Theoretical overlap: 100%

This report has been output to Console (F8)

OK

Alineación automática canal 2018



Register info

Final RMS: 0.18664 (computed on 590321 points)

Transformation matrix

1.000	0.000	-0.000	0.769
-0.000	1.000	-0.001	1.561
0.000	0.001	1.000	-3.996
0.000	0.000	0.000	1.000

Scale: fixed (1.0)

Theoretical overlap: 100%

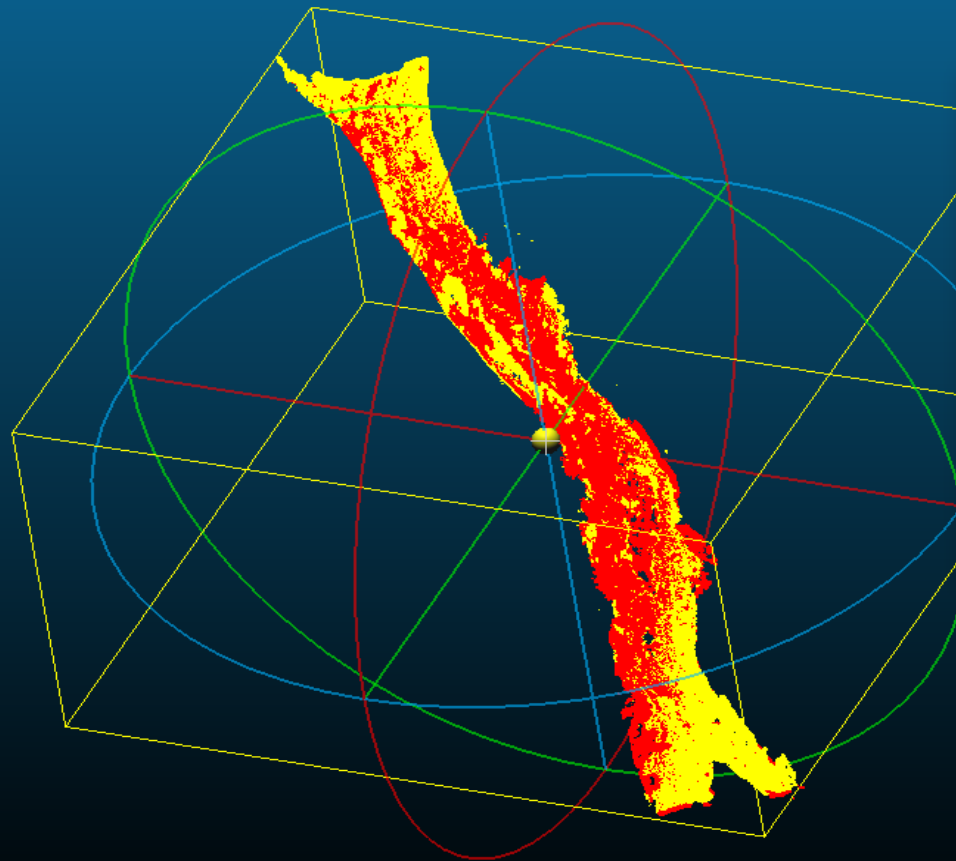
This report has been output to Console (F8)

OK

250



Alineación automática canal 2018NOV



Register info [X]

i Final RMS: 0.147536 (computed on 666477 points)

Transformation matrix

1.000	0.000	0.000	-0.144
-0.000	1.000	0.000	0.144
-0.000	-0.000	1.000	0.413
0.000	0.000	0.000	1.000

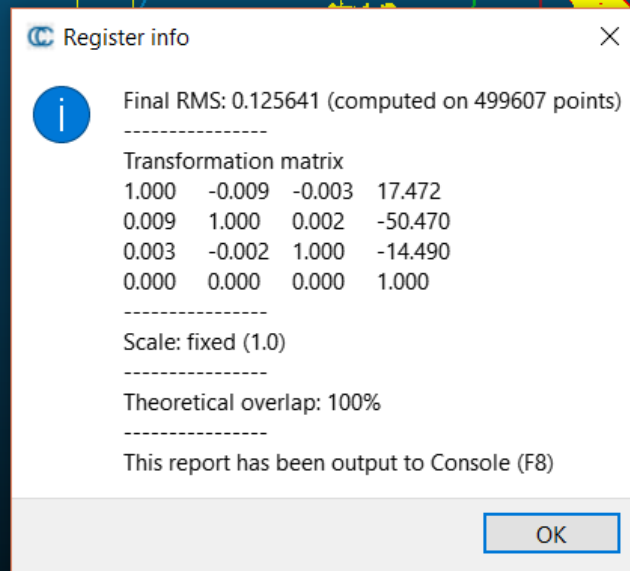
Scale: fixed (1.0)

Theoretical overlap: 100%

This report has been output to Console (F8)

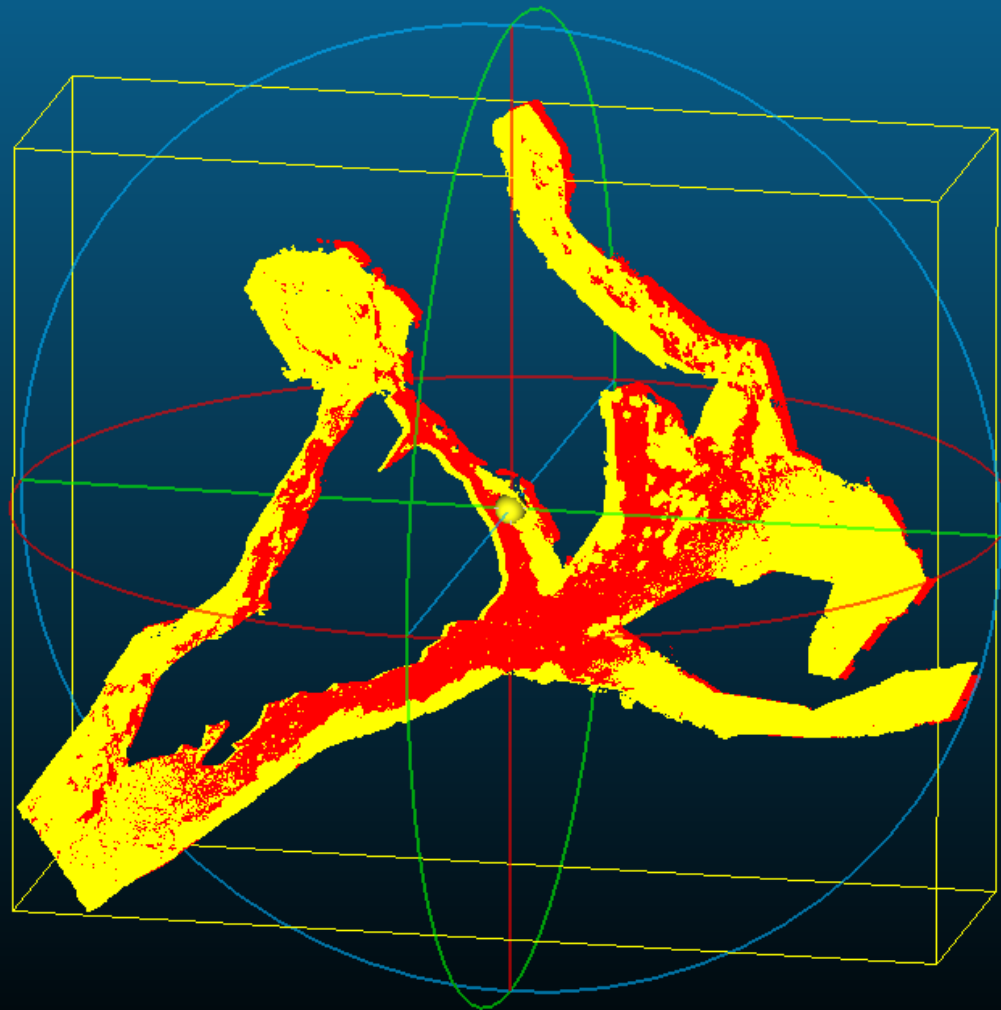
OK

Alineación automática cono de deyección 2016



200

Alineación automática cono de deyección 2017



Register info

Final RMS: 0.154802 (computed on 585838 points)

Transformation matrix

1.000	-0.001	-0.003	4.227
0.001	1.000	-0.003	0.265
0.003	0.003	1.000	-17.896
0.000	0.000	0.000	1.000

Scale: fixed (1.0)

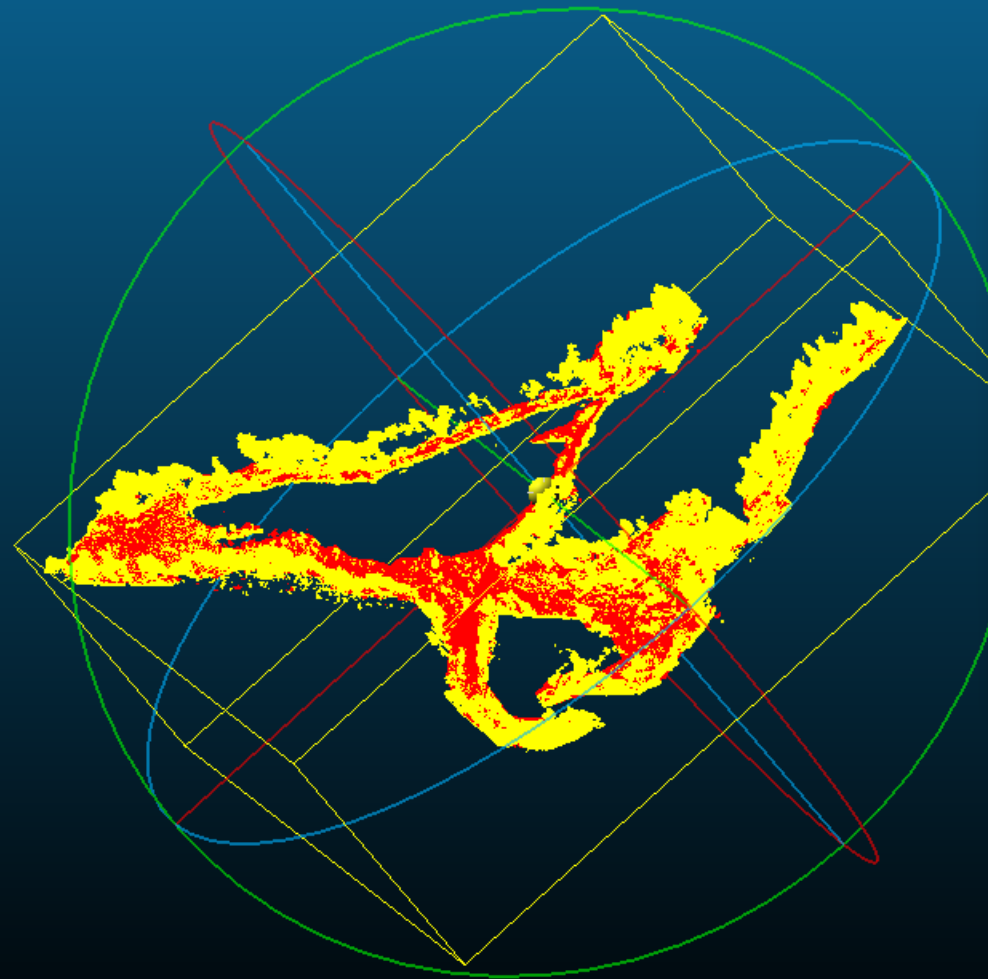
Theoretical overlap: 100%

This report has been output to Console (F8)

OK

200

Alineación automática cono de deyección 2018NOV



Register info [Close]

i Final RMS: 0.13231 (computed on 467845 points)

Transformation matrix

1.000	0.000	0.001	-4.675
-0.000	1.000	0.001	2.090
-0.001	-0.001	1.000	9.554
0.000	0.000	0.000	1.000

Scale: fixed (1.0)

Theoretical overlap: 100%

This report has been output to Console (F8)

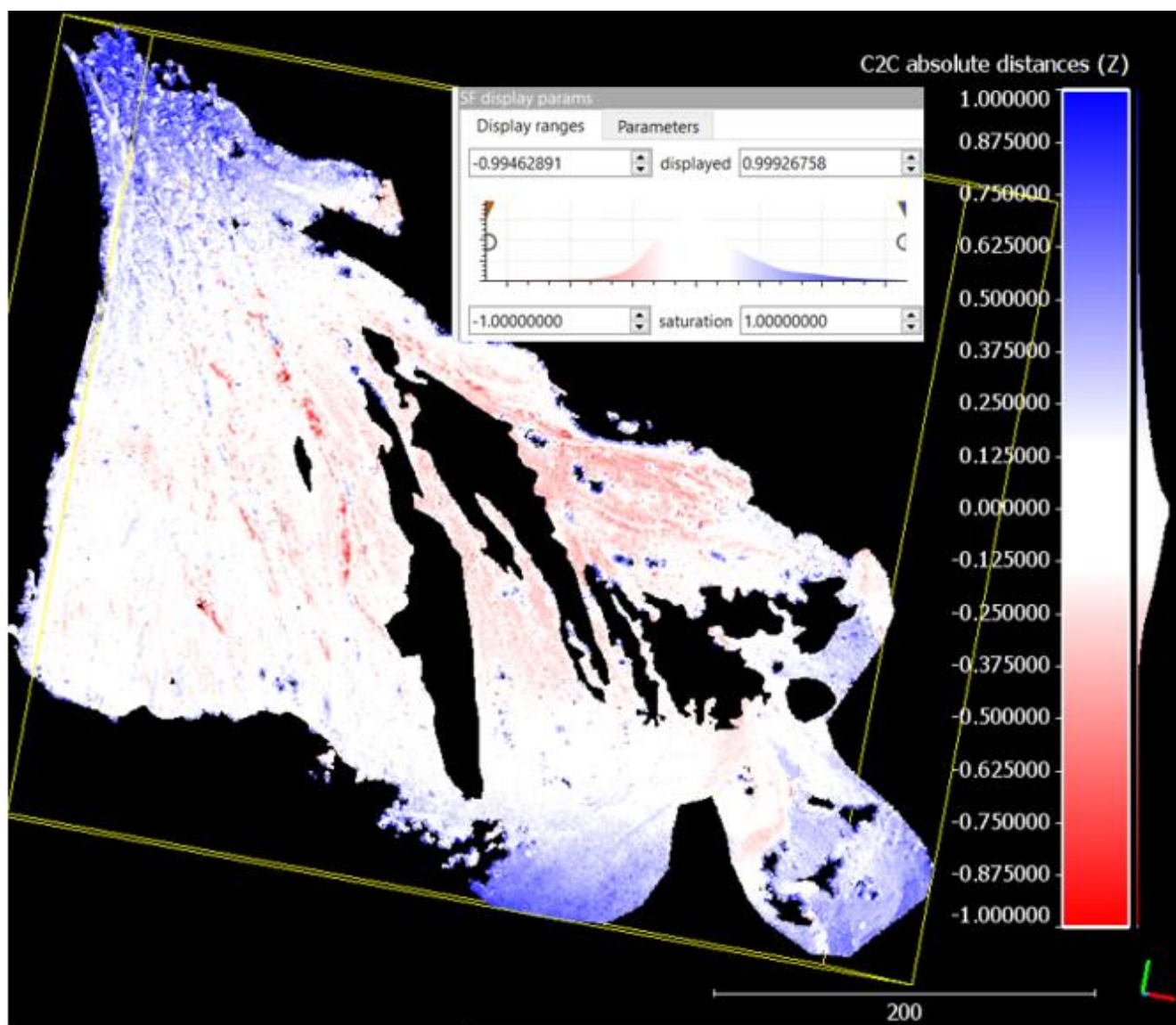
OK



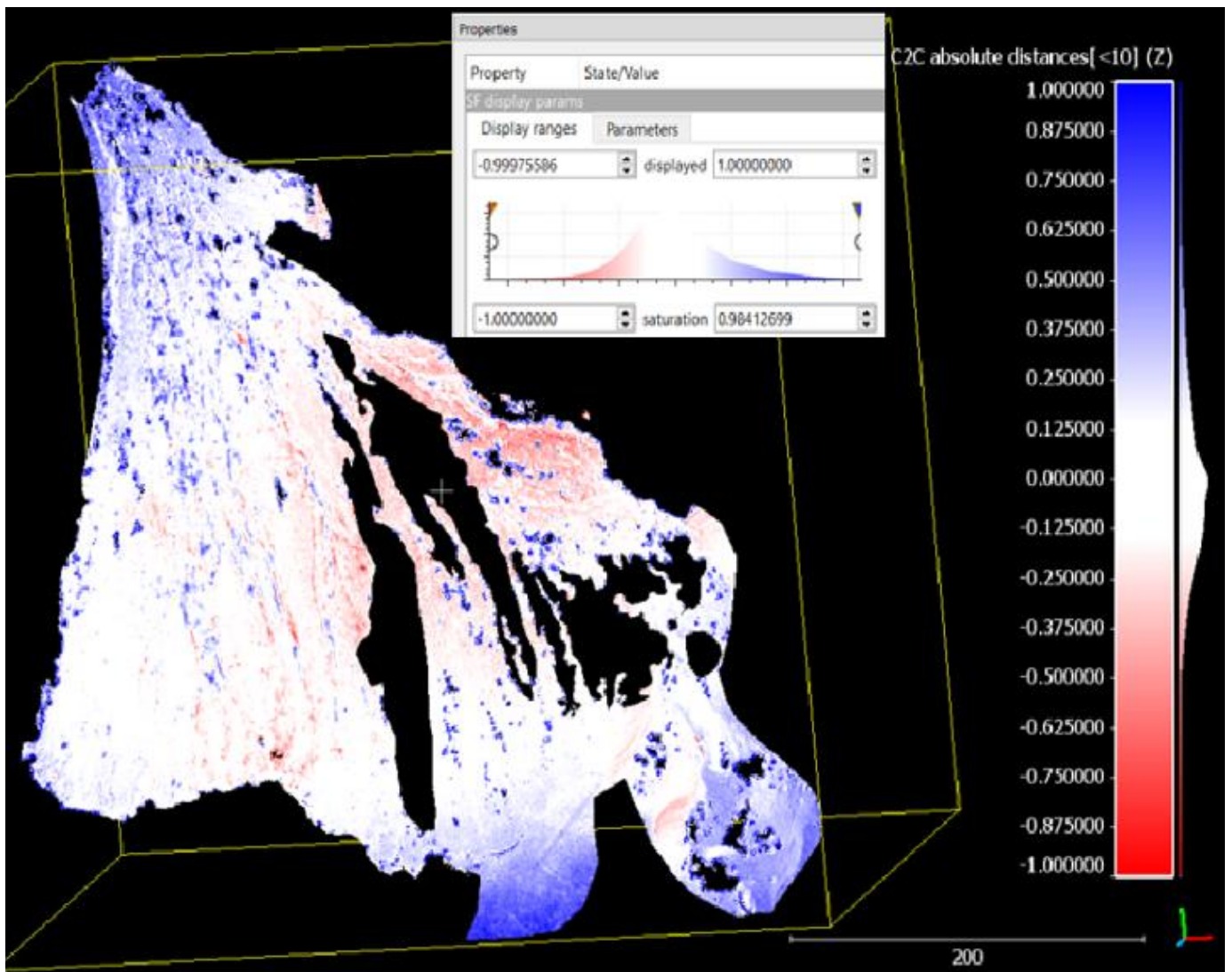
Anejo 12. Plantillas mapas de diferencias CloudCompare.

Área fuente

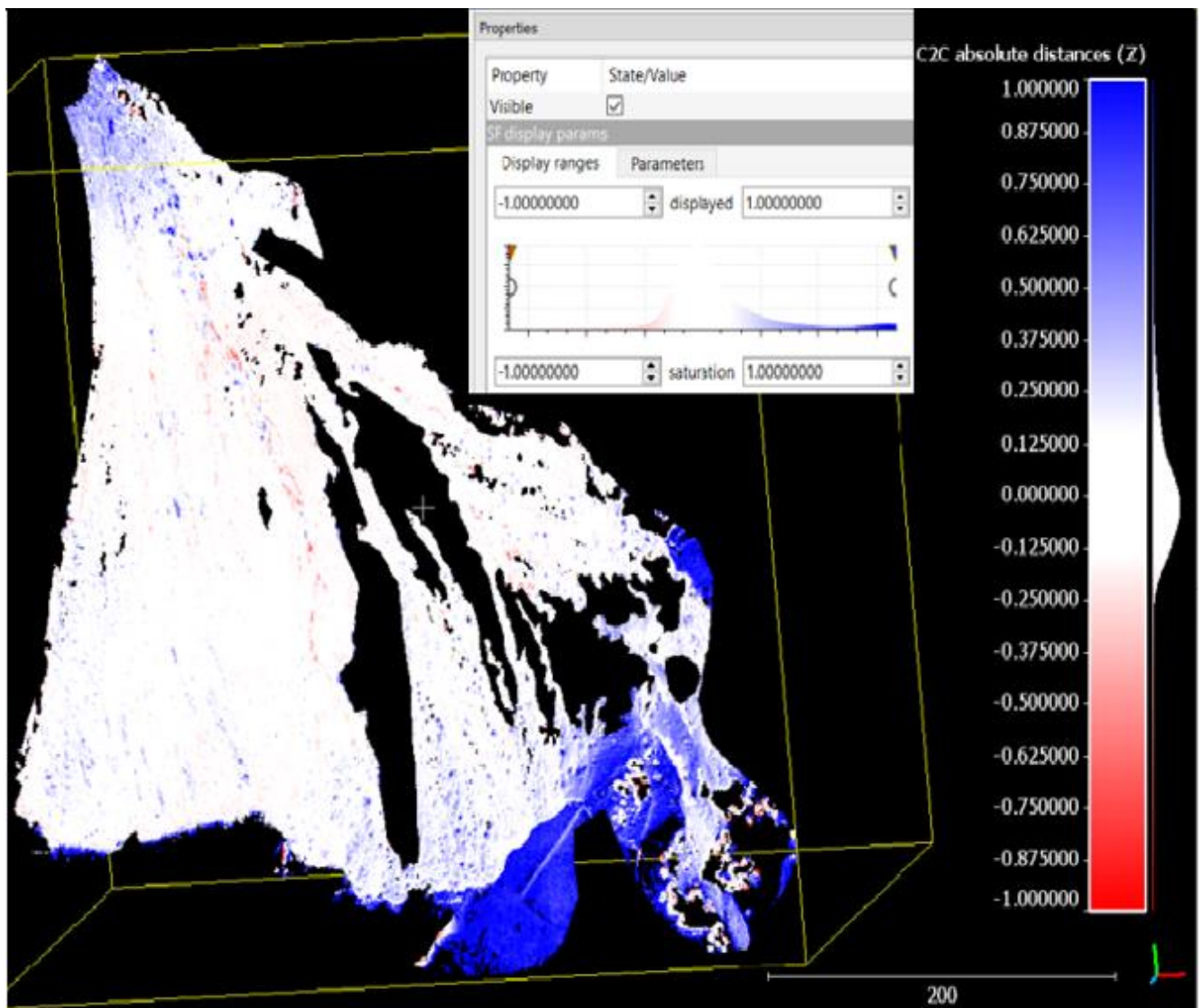
16-17



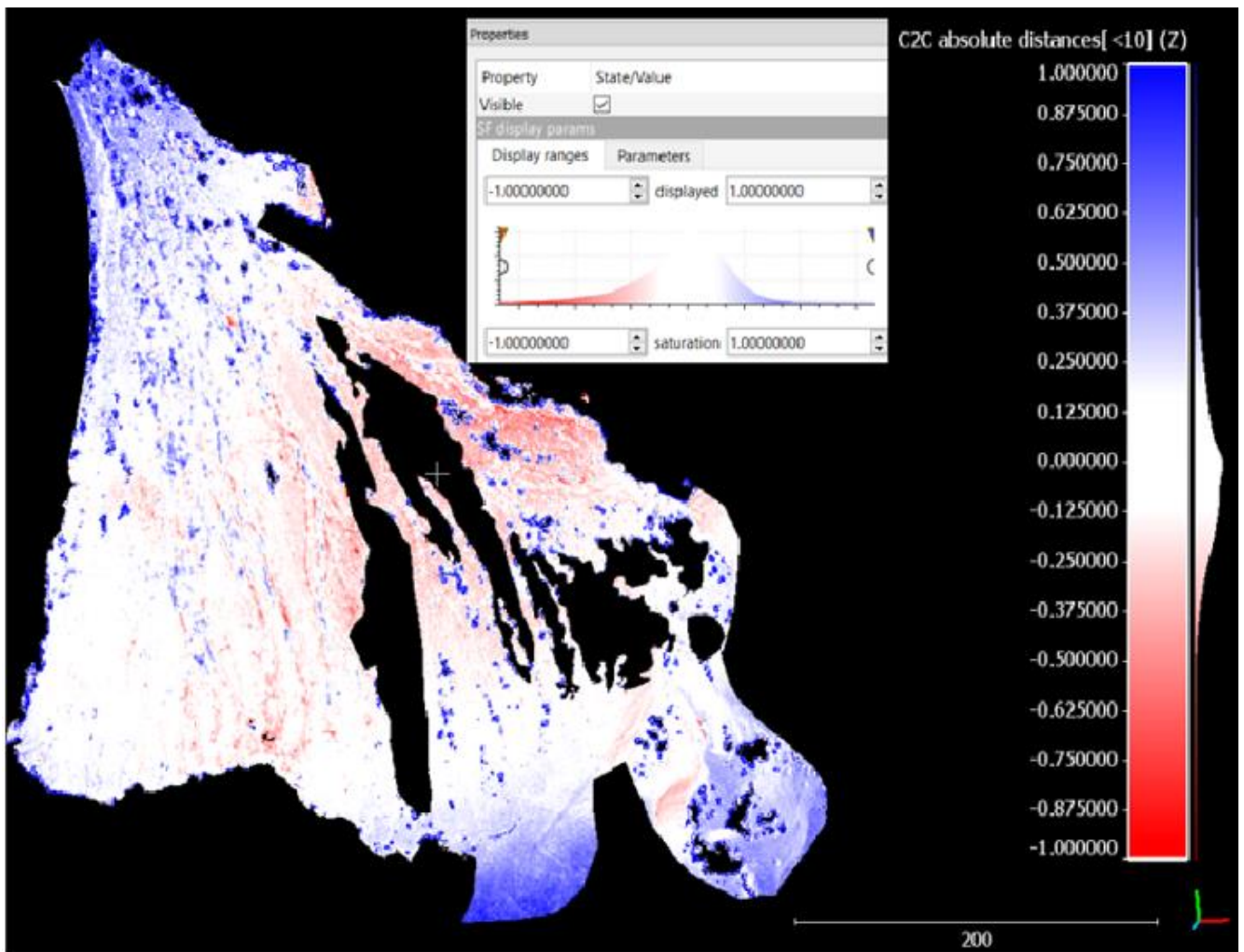
17-18



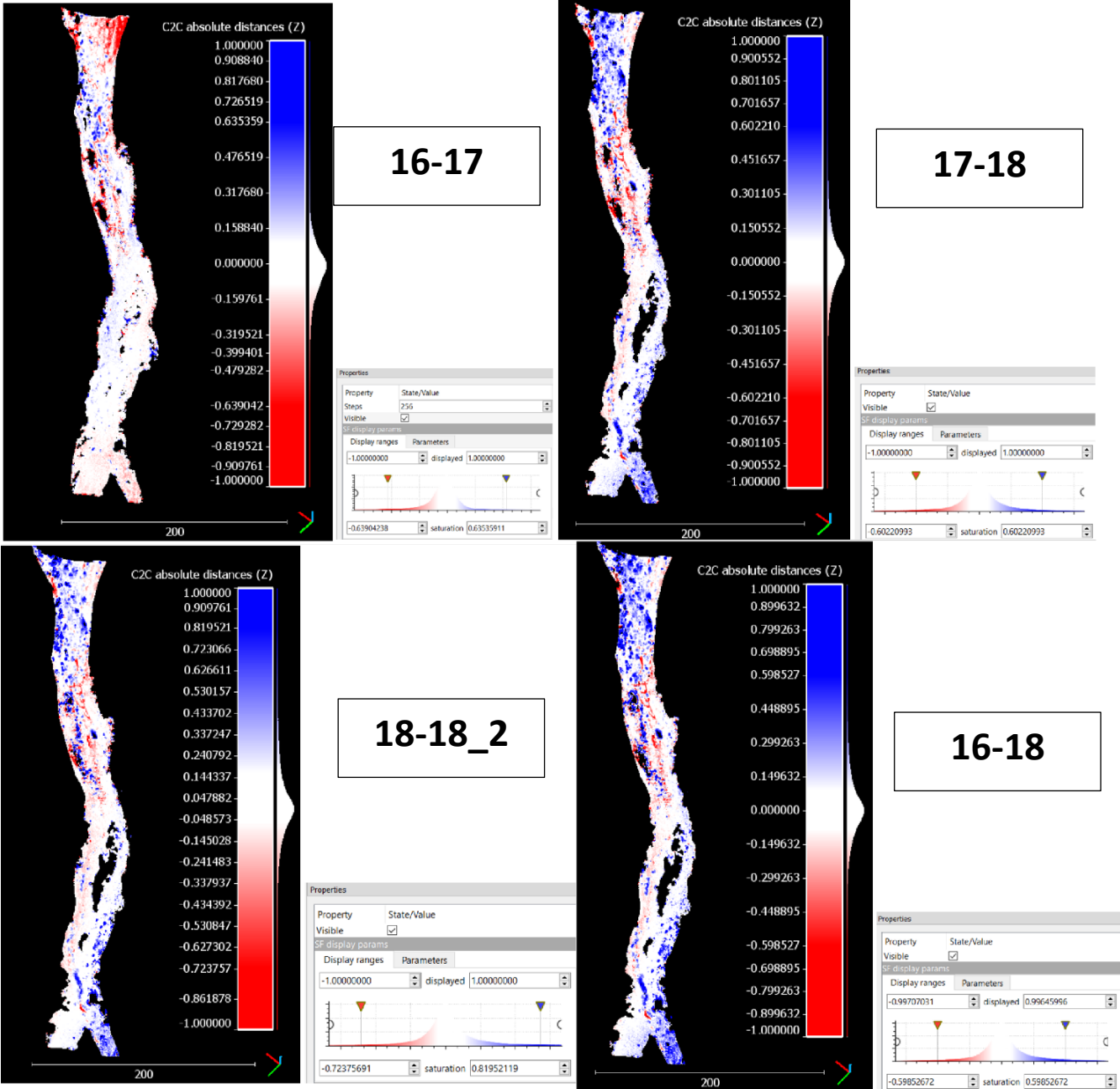
18-18_2



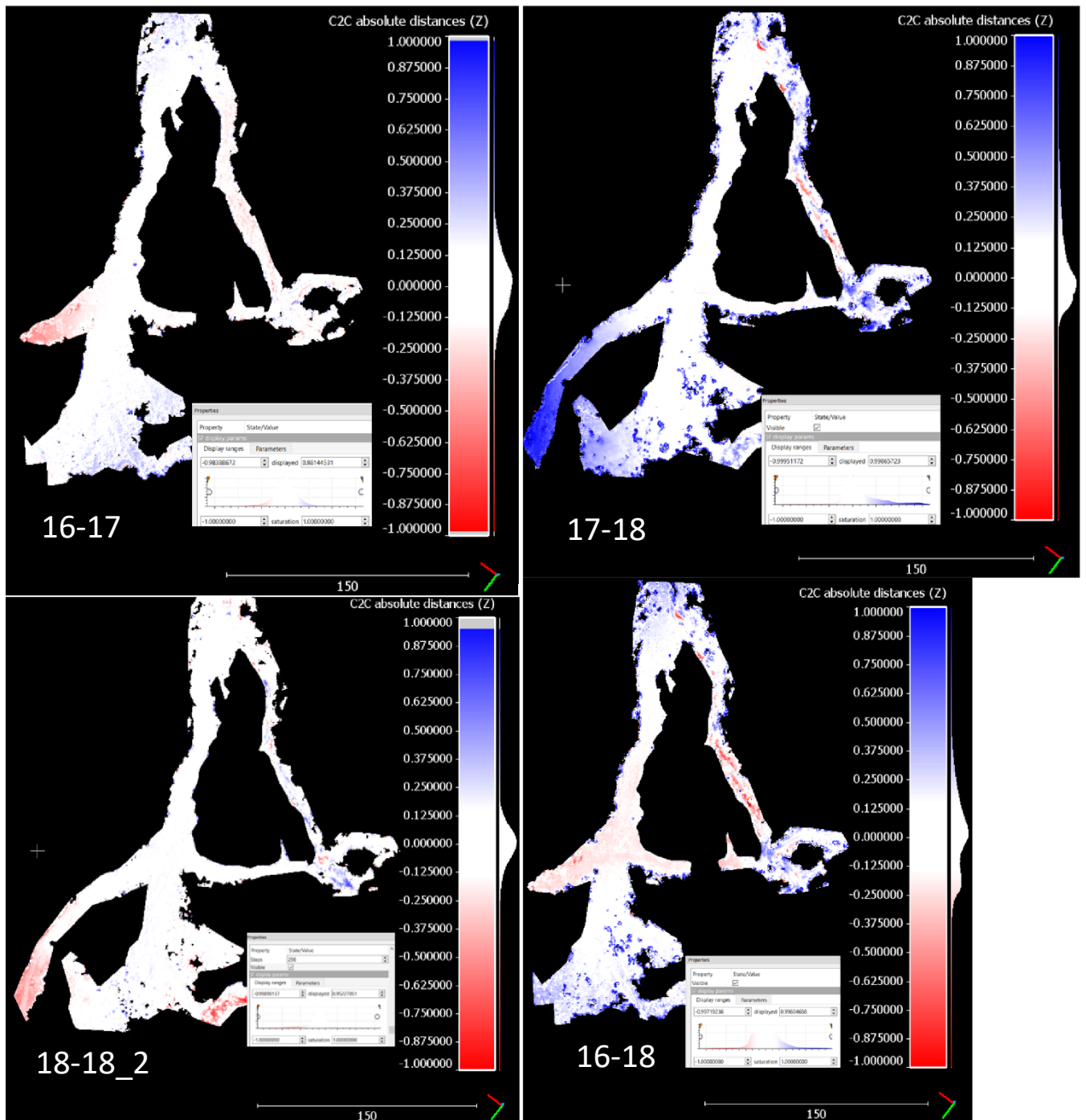
16-18



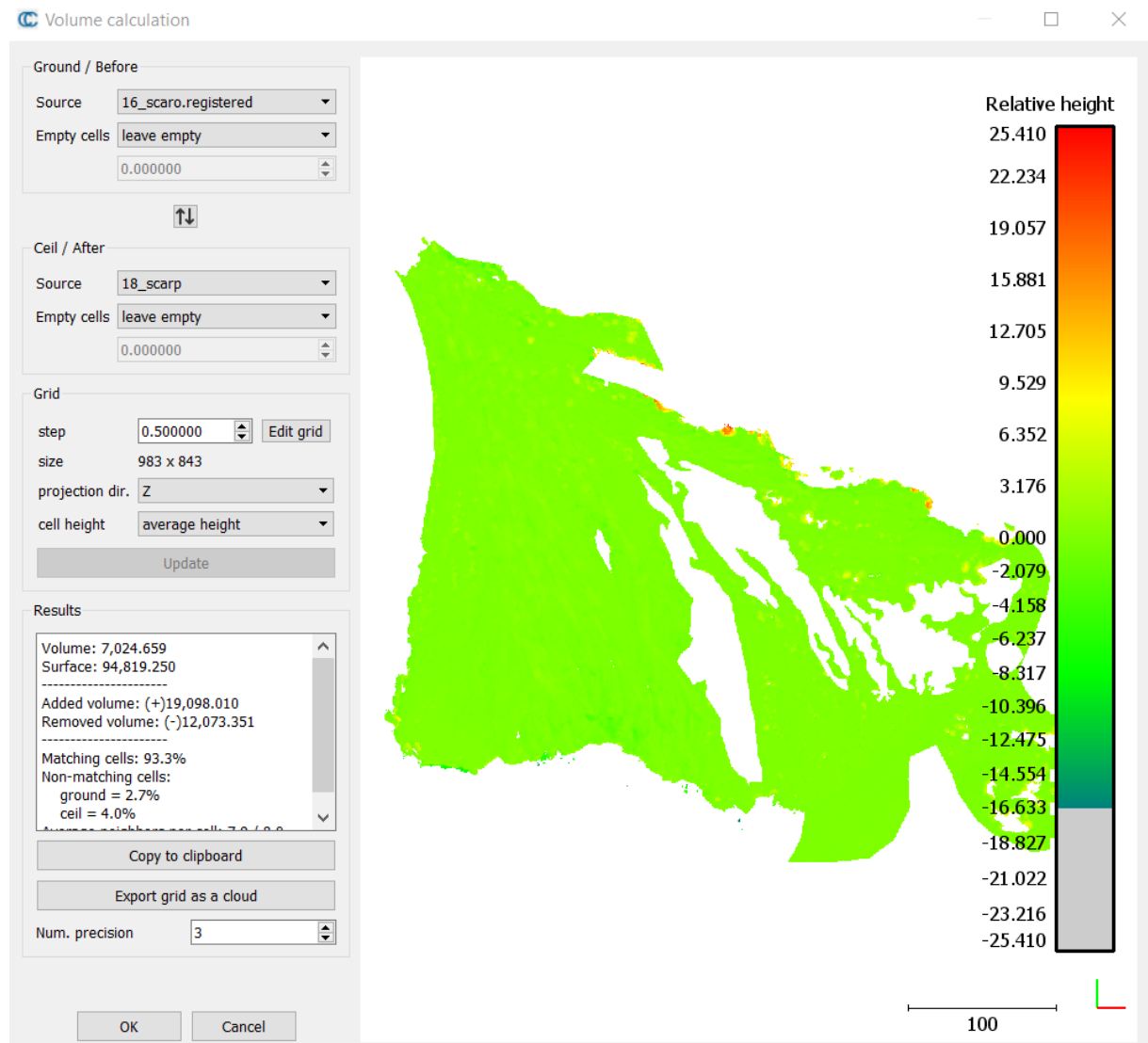
Canal



Cono de deyección



Anejo 13. Volumen total acumulado/desprendido entre la ortofoto de 2016 y junio de 2018.

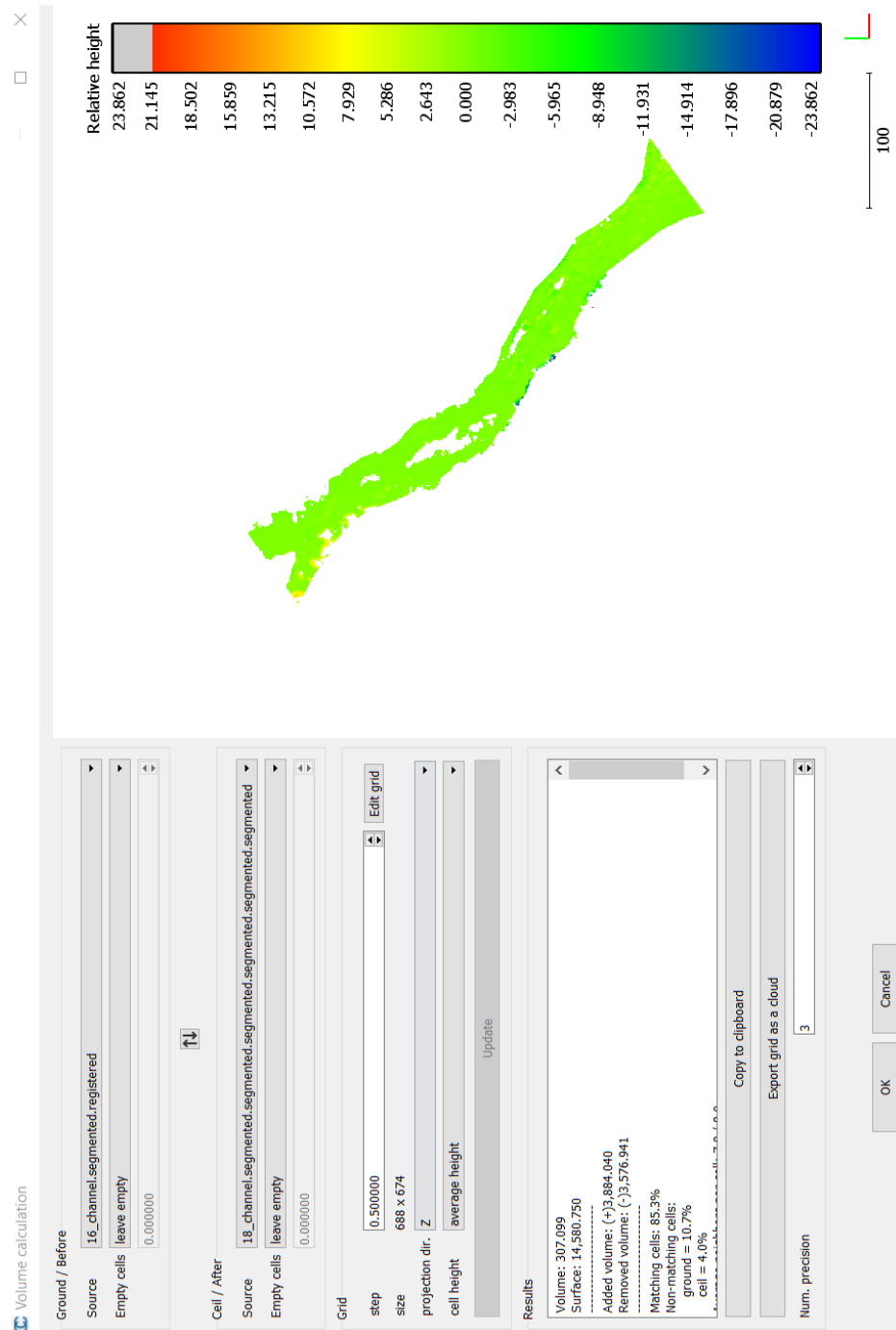


Volume: 7,024.659
Surface: 94,819.250

Added volume: (+)19,098.010
Removed volume: (-)12,073.351

Matching cells: 93.3%
Non-matching cells:
ground = 2.7%
ceil = 4.0%

Average neighbors per cell: 7.9 / 8.0

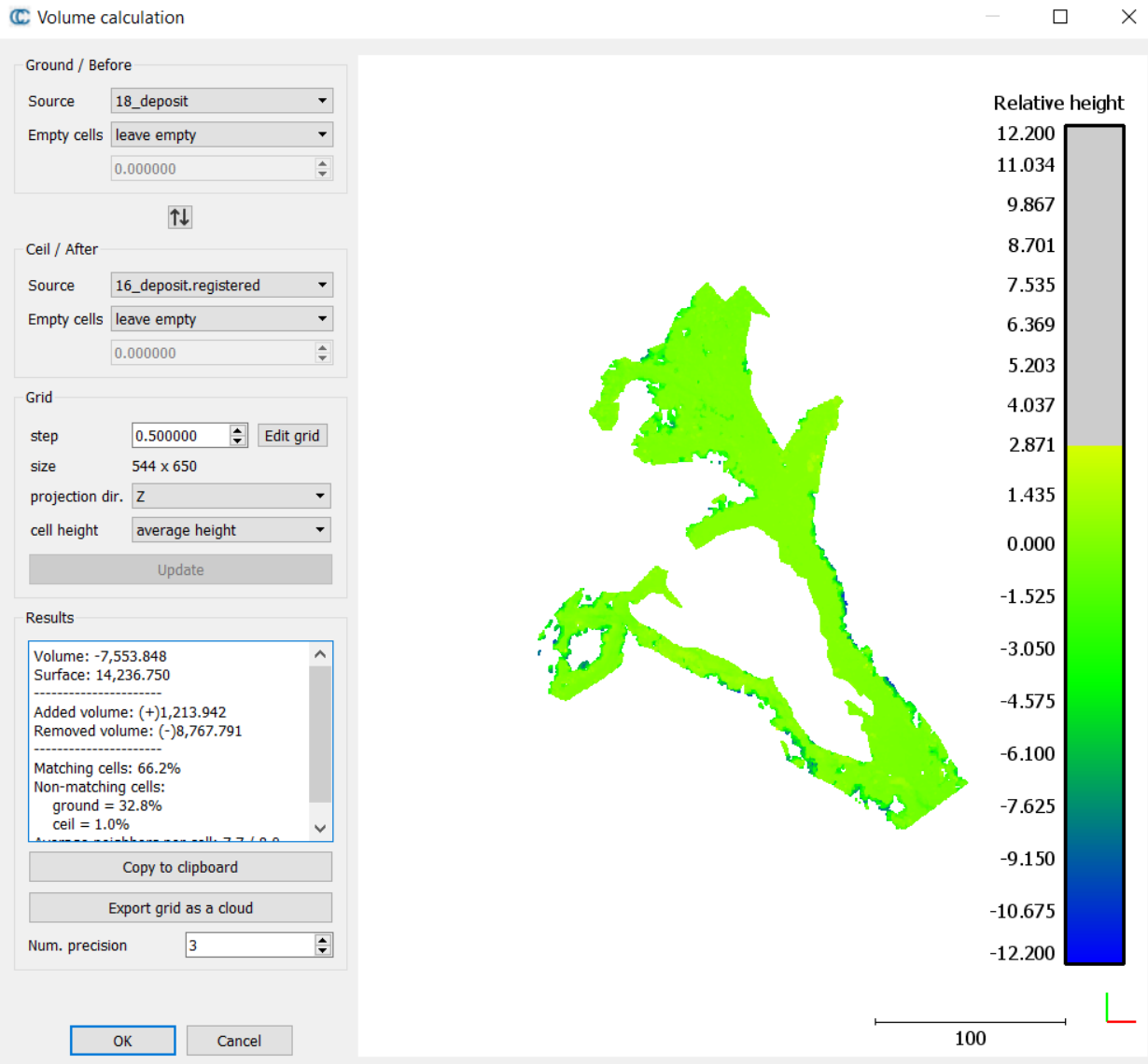


Volume: 307.099
Surface: 14,580.750

Added volume: (+)3,884.040
Removed volume: (-)3,576.941

Matching cells: 85.3%
Non-matching cells:
ground = 10.7%
ceil = 4.0%

Average neighbors per cell: 7.8 / 8.0



Volume: -7,553.848
Surface: 14,236.750

Added volume: (+)1,213.942
Removed volume: (-)8,767.791

Matching cells: 66.2%
Non-matching cells:
ground = 32.8%
ceil = 1.0%

Average neighbors per cell: 7.7 / 8.0